

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

**Helmut Auer**

**Aufbau und Bewertung von  
Messsystemen zur Erfassung  
von Kondensatfilmdicken in  
einem Trockenzylinder**

Mittweida, 2013



---

**DIPLOMARBEIT**

---

**Aufbau und Bewertung von  
Messsystemen zur Erfassung  
von Kondensatfilmdicken in  
einem Trockenzyylinder**

Autor:  
**Herr Ing.**

**Helmut Auer**

Studiengang:  
**Maschinenbau**

Seminargruppe:  
**KM08w2MHA**

Erstprüfer:  
**Prof. Dr.-Ing. Hans-Gerhard Kretzschmar**

Zweitprüfer:  
**Univ. Doz. DI. Dr. Andreas Eichler, MBA**

Einreichung:  
**Mittweida, 23.01.2013**

Verteidigung/Bewertung:  
**Mittweida, 2013**



## **Bibliografische Beschreibung:**

Auer, Helmut:

Aufbau und Bewertung von Messsystemen zur Erfassung von Kondensatfilmdicken in einem Trockenzylinder. - 2013. - IX, 78, XVIII S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Diplomarbeit, 2013

## **Referat:**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem erstmaligen Aufbau eines neu entwickelten Messprinzips, welches zum Messen von Kondensatfilmdicken an der Zylindermantelinnenseite eines Trockenzylinders herangezogen werden soll. Ein Versuchszylinder samt dem Messprinzip wurde aufgebaut, und ein Referenzmesssystem für Vergleichsmessungen vorgesehen. Mit diversen Versuchen wurden die beiden Messverfahren untersucht und die Messergebnisse verglichen. Anhand der Versuchsergebnisse wird entschieden, ob die Messsysteme für die Bestimmung des Kondensat-Verhalten in einem Trockenzylinder geeignet sind, bzw. für welche Auswertungen diese herangezogen werden können.



# Danksagung

Hiermit möchte ich mich ausdrücklich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung der Diplomarbeit unterstützt haben.

Ganz herzlich danke ich meinem Betreuer Univ. Doz. DI Dr. Andreas Eichler, MBA, der es ermöglicht hat, diese Diplomarbeit innerhalb der Firma Voith Paper GmbH zu schreiben und den hierfür benötigten Versuchsaufbau umzusetzen. Des Weiteren ist er mir bei Fragen stets zur Seite gestanden und gab mir konstruktive Vorschläge bei der Ausarbeitung der Diplomarbeit.

Ebenfalls für die Betreuung möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Hans-Gerhard Kretzschmar bedanken.

Abschließender Dank gilt den Korrekturlesern. Diesbezüglich möchte ich noch Herrn Herbert Pigisch erwähnen.

# Inhalt

<b>Inhalt .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Allgemein .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	1
1.3 Kapitelübersicht .....	1
<b>2 Grundlegende Themeneinführung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Die Papier- bzw. Kartonmaschine .....	3
2.1.1 Konstantteil .....	4
2.1.2 Siebpartie .....	4
2.1.3 Pressenpartie .....	5
2.1.4 Trockenpartie .....	5
2.2 Die Kondensat-Niveau-Messung .....	7
2.2.1 Das Schauglasmessprinzip .....	7
2.3 Versuchsaufbau – Schauglasmessung .....	7
<b>3 Versuchsaufbau – Schauglasmessung .....</b>	<b>9</b>
3.1 Konstruktion - Umsetzung .....	9
3.1.1 Konstruktion Versuchszylinder .....	9
3.1.2 Schauglasbefestigung .....	10
3.1.3 Schauglasmessung .....	12
3.1.4 Referenzmessprinzip .....	14
3.1.5 Elektrischer Messaufbau .....	15
3.1.6 Spannungsversorgung / Schleifring .....	15
3.2 Montageablauf .....	19
3.2.1 Montage Versuchsaufbau .....	19
3.2.2 Arbeiten zur Messelektronik .....	21
3.2.3 Montage Zwischenring .....	22



---

3.2.4	Montage der Messelektronik .....	23
3.2.5	Schleifring und Kohlebürstenhalter.....	24
3.2.6	Antriebsriemen und Sicherheitseinrichtungen .....	26
3.3	<i>Probleme der Messtechnik / Optimierung</i> .....	27
3.3.1	Ausfall der Füllstandschalter .....	27
3.3.2	Überprüfung der Füllstandschalter .....	28
3.3.3	Abänderung des Messprinzips .....	29
3.4	<i>Installation / Einrichten der WLAN – Verbindung</i> .....	30
3.5	<i>Optimierung der Messelektronik</i> .....	31
3.5.1	Erste Übertragungsergebnisse.....	31
3.5.2	Optimierung der Messsignale.....	31
3.6	<i>Auswertung der Messsignale</i> .....	33
3.6.1	Auswertung der Schauglassignale .....	33
3.6.2	Auswertung des Sensorsignals .....	35
<b>4</b>	<b>Versuche am Versuchszylinder .....</b>	<b>39</b>
4.1	<i>Erforderliche Berechnungen</i> .....	39
4.1.1	Ermittlung der Zylindergeschwindigkeit .....	39
4.1.2	Berechnung der Wassermenge (Kreissegment).....	41
4.1.3	Berechnung der Wassermenge (Ringbildung).....	43
4.2	<i>Grundsätzliche Arten des Kondensat-Verhaltens</i> .....	45
4.3	<i>Versuche und Auswertungen am Versuchszylinder</i> .....	46
4.3.1	Versuche bei Wassersumpf – Betrieb .....	47
4.3.2	Versuche bei Wasserring – Betrieb .....	54
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>77</b>
<b>Literatur</b>	<b>.....</b>	<b>79</b>
<b>Anlagen</b>	<b>.....</b>	<b>81</b>
<b>Anlagen, Teil 1</b>	<b>.....</b>	<b>A-I</b>
<b>Anlagen, Teil 2</b>	<b>.....</b>	<b>A-IV</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>		

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer Papiermaschine [1] .....	3
Abbildung 2-2: Foto einer Papiermaschine [2] .....	4
Abbildung 2-3: Ausschnitt einer Trockenpartie .....	5
Abbildung 2-4: Modell eines Trockenzylinders.....	6
Abbildung 2-5: Störleisten im Trockenzylinder [4].....	6
Abbildung 2-6: Aufbaubasis für Versuchszylinder.....	8
Abbildung 3-1: Konstruktion Versuchsaufbau .....	10
Abbildung 3-2: Zylinder mit Versuchsaufbau .....	12
Abbildung 3-3: Schauglas bzw. Schauglasrückseite mit Messbohrungen.....	13
Abbildung 3-4: Ultraschallsensor mic+25/IU/TC [5] .....	14
Abbildung 3-5: Elektrischer Messaufbau .....	15
Abbildung 3-6: Schleifring am Versuchszylinder.....	16
Abbildung 3-7: Zweigeteilter Isolatorring.....	17
Abbildung 3-8: Schleifringkonstruktion.....	18
Abbildung 3-9: Schleifring mit Kohlebürstenhalter .....	19
Abbildung 3-10: Verschrauben des Versuchsaufbaus .....	20
Abbildung 3-11: Zylinder samt Versuchsaufbau .....	20
Abbildung 3-12: Einkleben der Messleitungen.....	21
Abbildung 3-13: Messleitungen im Inneren des Schauglases.....	21
Abbildung 3-14: Verkabelung der Füllstandschalter.....	22

---

Abbildung 3-15: Rundlaufkontrolle Zwischenring .....	23
Abbildung 3-16: Messelektronik am Versuchsaufbau.....	24
Abbildung 3-17: Zusammenbau Schleifring.....	24
Abbildung 3-18: Schleifring am Versuchszylinder.....	25
Abbildung 3-19: Schleifring und Kohlebürstenhalter.....	26
Abbildung 3-20: Versuchszylinder .....	27
Abbildung 3-21: IC am Füllstandscharter [9].....	28
Abbildung 3-22: Abgeänderter elektrischer Messaufbau .....	30
Abbildung 3-23: Messaufbau für optimierte Messsignale .....	32
Abbildung 3-24: Signalvergleich: Mit bzw. ohne Potentiometer .....	33
Abbildung 3-25: Ultraschallsensor Erfassungsbereich [5].....	35
Abbildung 3-26: Einstellung Ultraschallsensor .....	36
Abbildung 4-1: Maße Kreissegment .....	41
Abbildung 4-2: Maße Wasserring.....	43
Abbildung 4-3: Kondensatzustände in rotierenden Zylindern [11].....	45
Abbildung 4-4: Kondensatdicke am Umfang eines Trockenzylinders [10] .....	45
Abbildung 4-5: Kondensatfilmdickenverhältnis am Umfang des Versuchszylinders.....	46
Abbildung 4-6: Vergleichsmessung bei 80 m/min ohne Prüffunktion .....	47
Abbildung 4-7: Vergleichsmessung bei 80 m/min mit Prüffunktion .....	48
Abbildung 4-8: Vergleichsmessung bei 150 m/min ohne Prüffunktion .....	49
Abbildung 4-9: Vergleichsmessung bei 150 m/min mit Prüffunktion .....	49
Abbildung 4-10: Schauglas beim Sumpfdurchlauf.....	51
Abbildung 4-11: Signalverlauf beim Sumpfdurchlauf bei 150 m/min.....	52

---

Abbildung 4-12: Signalverlauf beim Sumpfdurchlauf bei 80 m/min .....	53
Abbildung 4-13: Vergleichsmessung bei 2,4 mm Ringdicke und 600 m/min .....	56
Abbildung 4-14: Vergleichsmessung bei 2,4 mm Ringdicke und 800 m/min .....	57
Abbildung 4-15: Vergleichsmessung bei 2,4 mm Ringdicke und 1000 m/min .....	58
Abbildung 4-16: Vergleichsmessung bei 2,4 mm Ringdicke und 1150 m/min .....	59
Abbildung 4-17: Vergleichsmessung bei 4,4 mm Ringdicke und 600 m/min .....	60
Abbildung 4-18: Vergleichsmessung bei 4,4 mm Ringdicke und 800 m/min .....	61
Abbildung 4-19: Vergleichsmessung bei 4,4 mm Ringdicke und 1000 m/min .....	62
Abbildung 4-20: Vergleichsmessung bei 4,4 mm Ringdicke und 1150 m/min .....	63
Abbildung 4-21: Vergleichsmessung bei 10 mm Ringdicke und 670 m/min .....	64
Abbildung 4-22: Vergleichsmessung bei 10 mm Ringdicke und 1000 m/min .....	65
Abbildung 4-23: Abweichung durchschn. Sensormesswert / theoret. Füllstand (1) .....	68
Abbildung 4-24: Abweichung durchschn. Sensormesswert / theoret. Füllstand (2) .....	69
Abbildung 4-25: Abweichung Spitze-Tal-Wert Sensor / Theorie .....	70
Abbildung 4-26: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / theoret. Füllstand (1) .....	71
Abbildung 4-27: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / theoret. Füllstand (2) .....	72
Abbildung 4-28: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / durchschn. Sensormesswert (1) .....	73
Abbildung 4-29: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / durchschn. Sensormesswert (2) .....	74
Abbildung 4-30: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / durchschn. Sensormesswert bei 1000 m/min .....	75



---

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1: Sphäroguss- / Kunststoffabelle .....	17
Tabelle 4-1: Errechnete Zylindergeschwindigkeiten.....	40
Tabelle 4-2: Gemessene Zylindergeschwindigkeiten.....	41
Tabelle 4-3: Volumentabelle für Kreissegmentbildung.....	42
Tabelle 4-4: Volumentabelle für Wasserringbildung.....	44
Tabelle 4-5: Versuchsplan bei Sumpfbetrieb .....	47
Tabelle 4-6: Auswertungsübersicht Wassersumpf-Betrieb.....	53
Tabelle 4-7: Versuchsplan bei Ringbetrieb 2 mm – 3,6 mm.....	55
Tabelle 4-8: Versuchsplan bei Ringbetrieb 4 mm – 5,6 mm.....	55
Tabelle 4-9: Versuchsplan bei Ringbetrieb 6 mm – 10 mm.....	55
Tabelle 4-10: Auswertungsübersicht Wasserring-Betrieb (1) .....	66
Tabelle 4-11: Auswertungsübersicht Wasserring-Betrieb (2) .....	67



## Abkürzungsverzeichnis

<b>WLAN</b>	Wireless local area network
<b>PTFE</b>	Polytetrafluorethylen
<b>PEEK GF 30</b>	Polyetheretherketon glasfaserverstärkt
<b>LED</b>	Light emitting diode
<b>IC</b>	Integrated circuit
<b>IP Adresse</b>	Internet Protokoll Adresse
<b>US</b>	Ultraschallsensor
<b>Abw</b>	Abweichung
<b>SG</b>	Schauglas
<b>PF</b>	Prüffunktion
<b>ND</b>	Neu definiert (Bestimmung Wasservolumen)
<b>DV</b>	Differenzvolumen (Bestimmung Wasservolumen)





# 1 Allgemein

Zur Einleitung in das Thema werden in diesem Kapitel zunächst die Motivation und das Ziel der Diplomarbeit vorgestellt sowie ein kurzer Überblick der einzelnen Kapitel geliefert.

## 1.1 Motivation

Aufgrund der Tatsache, dass Energie einen immer wesentlicheren Kosteneinfluss hat, muss versucht werden, unnötigen Energieverbrauch zu vermeiden. Somit gilt es Optimierungen zu entwickeln, um eine möglichst effiziente Nutzung der Energie gewährleisten zu können.

Bei dem mit dieser Arbeit behandelten Thema betrifft dies überhitzten Dampf, welcher zur Beheizung von Guss-Trockenzylindern bei der Papier- bzw. Kartonerzeugung in Papiermaschinen herangezogen wird. Dazu soll das thermodynamische Verhalten in einem realen Trockenzylinder mittels verschiedener Messsysteme untersucht werden.

## 1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Rahmen der Aufgabenstellung mit der erstmaligen Umsetzung eines entwickelten Messprinzips an einem Versuchszylinder, welches in weiterer Folge an einem real bedampften Trockenzylinder zur Auswertung herangezogen wird.

Mit dem Messprinzip sollen diverse Versuche durchgeführt, interpretiert und gegebenenfalls Optimierungen umgesetzt werden. Schlussendlich gilt es zu überprüfen, ob diese Art der Messung den Anforderungen gerecht wird und Messwerte liefert, welche der Realität entsprechen. Es soll eine Aussage getätigt werden, für welche Betriebsbereiche und Auswertungen das Messprinzip herangezogen werden kann.

## 1.3 Kapitelübersicht

Diese Diplomarbeit besteht aus 5 Kapiteln.

Nach der allgemeinen Einleitung in Kapitel 1 wird in **Kapitel 2** der grundlegende Prozess bei der Papier- bzw. Kartonherstellung beschrieben. Die Sektionen einer Papiermaschine sind erklärt und deren Aufgabe kurz erläutert. Auf den thermischen Trocknungsprozess in der Trockenpartie wird etwas genauer eingegangen.

In **Kapitel 3** wird die Ausführung und erstmalige Realisierung des entwickelten Messprinzips, des hierfür benötigten Versuchszylinders sowie der Messelektronik und der Datenübertragung beschrieben. Es wird auch ein Überblick der bei der Abwicklung des Projektes aufgetretenen Herausforderungen gegeben.

Des Weiteren werden die Montagetätigkeiten erläutert, Probleme der Messtechnik beschrieben und die Einrichtung der kabellosen Datenübertragung erklärt. Erkenntnisse der ersten Übertragungsergebnisse sowie der notwendige Optimierungsbedarf werden beschrieben.

Anschließend werden in **Kapitel 4** Berechnungen beschrieben, die für den Versuchsaufbau erforderlich sind. Die mit dem entwickelten Messsystem durchgeführten Versuche werden vorgestellt. Versuchspläne werden erläutert und die Ergebnisse des Messsystems ausgewertet. Es wird diskutiert, für welche Auswertungen das untersuchte Messsystem herangezogen werden kann.

Schließlich erfolgt in **Kapitel 5** eine Zusammenfassung der Diplomarbeit. Es wird definiert, für welche Betriebsbereiche und Auswertungen das untersuchte Messsystem geeignet ist.

## 2 Grundlegende Themeneinführung

In diesem Kapitel wird der grundlegende Prozess bei der Herstellung von Papier bzw. Karton in einer entsprechenden Produktionsmaschine beschrieben. Die wesentlichen und stets vorhandenen Sektionen einer derartigen Papier- bzw. Kartonmaschine werden angeführt und eine Erklärung über den jeweils stattfindenden Prozess gegeben. Die Trockenpartie, jene Sektion in der die bereits erwähnten dampfbeheizten Trockenzylinder für die Trocknung des Papiers sorgen, wird etwas genauer erläutert. Des Weiteren wird das im Zuge dieser Diplomarbeit zu untersuchende Messverfahren sowie die Anforderungen an den gesamten Versuchsaufbau vorgestellt.

### 2.1 Die Papier- bzw. Kartonmaschine

„Die Papier- bzw. Kartonmaschine ist eine Sondermaschine zur Herstellung von Papier, Karton oder Pappe.“ [3]

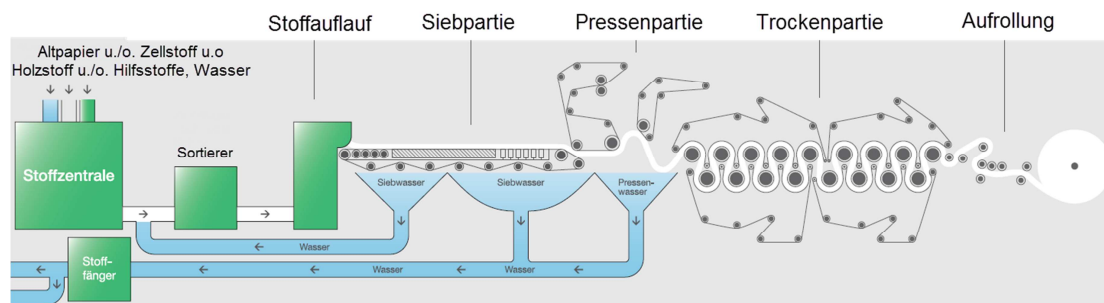


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer Papiermaschine [1]

„Die Langsieb-Papiermaschine wurde 1798 von dem Franzosen Nicholas-Louis Robert erfunden. An dem Prinzip seiner Papiermaschine hat sich seither nichts verändert. Eine Fasersuspension wird über ein Schöpfrad und einen Stoffauflauf auf ein Schüttelsieb, die Siebpartie, aufgebracht und entwässert. Das grob entwässerte, aber noch nasse Papier wird anschließend durch Presswalzen geleitet (Pressenpartie) und durch die heutzutage mit dampfbeheizten Trockenzylindern versehene Trockenpartie weiter getrocknet.“ [3]

„Die Abmessungen liegen derzeit bei bis zu 12 m Arbeitsbreite und einer Gesamtlänge von bis zu mehreren 100 m, die Gesamthöhe erstreckt sich auf über 2 Stockwerke. Die

Produktionsgeschwindigkeit beträgt bis zu 2200 m/min für Zeitungspapiere, Tissuepapiere und eventuell Testliner.“ [3]



Abbildung 2-2: Foto einer Papiermaschine [2]

### 2.1.1 Konstantteil

„Mit der Bezeichnung Konstantteil werden alle Anlagenteile zwischen Misch- bzw. Maschinenbütte und Stoffauflauf der Papiermaschine zusammengefasst. Der Konstantteil dient dazu, die Stoffaufbereitung mit dem Stoffauflauf der Papiermaschine zu verbinden. Die Stoffsuspension wird in diesem Bereich auf die erforderliche Stoffdichte verdünnt. Die Stoffdichte in diesem Bereich beträgt zwischen ca. 0,03 und 1,5 %.“ [3]

### 2.1.2 Siebpartie

„Die Siebpartie einer Langsieb-Papiermaschine besteht aus dem Stoffauflauf, verschiedenen Entwässerungselementen wie Streichleisten und Unterdrucksaugern sowie gegebenenfalls einem Egoutteur bzw. Hybrid-Former. Nach der Verdünnung und Sortierung der Faserstoff-Suspension im Konstantteil muss die Suspension nun gleichmäßig in Papierbahnbreite dem Blattbildungsteil (der Siebpartie) zugeführt werden. Dies ist die Aufgabe des Stoffauflaufs. Die Entwässerungselemente dienen der Entfernung des Suspensions-

wassers. Der Egoutteur bzw. Hybrid-Former ist für die Herstellung einer gleichmäßigen Oberfläche mit feiner Struktur verantwortlich. Nach der Siebpartie liegt ein Trockengehalt von bis zu 24 % vor.“ [3]

### 2.1.3 Pressenpartie

„In der Pressenpartie wird das feuchte Faservlies von einem Abnahmesauger (Saugwalze oder statisches Unterdruckelement) auf den Pressfilz abgegautscht. Die Aufgabe des Pressfilzes ist der Transport der Faserstoffbahn durch Pressnips verschiedener Konstellationen. Der Trockengehalt der Bahn beträgt nach der Pressenpartie bis zu 55 %. Die Pressenpartie ist die letzte Sektion, mit der mechanisch entwässert wird.“ [3]

### 2.1.4 Trockenpartie

„Die Trockenpartie ist verantwortlich für das Erreichen des Endfeuchtegehaltes der Papierbahn. Dieser steht im Gleichgewichtszustand zur Umgebungsluft (Papier ca. 4 bis 6 % bzw. Karton und Pappe 8 bis 12 %). In der Regel handelt es sich dabei um eine thermische Trocknung mithilfe von dampfbeheizten Trockenzylindern. In der Trockenpartie befinden sich auch gegebenenfalls noch eine Leim- bzw. Filmpresse oder sonstige Veredelungseinheiten zur Hydrophobierung der Papierbahnoberfläche. Jedoch können diese Auftragsaggregate auch Offline, also nach der Maschine zum Einsatz kommen.“ [3]

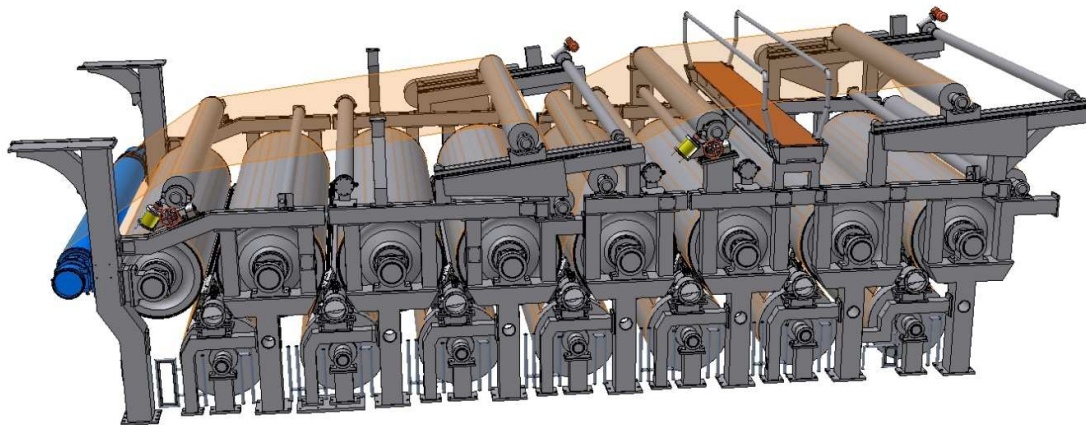


Abbildung 2-3: Ausschnitt einer Trockenpartie

#### 2.1.4.1 Der thermische Trocknungsprozess

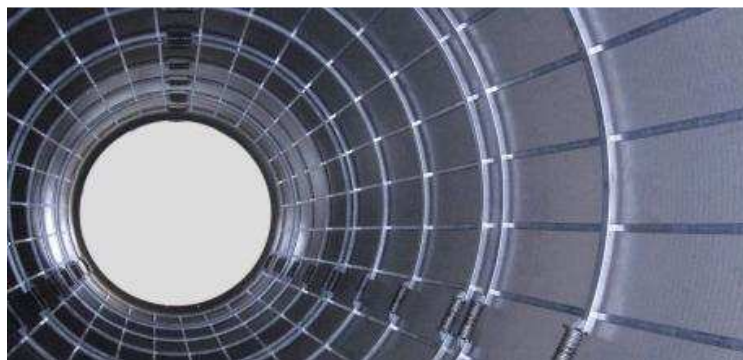
Um das annähernd vollständige Trocknen des Papiers auf thermischem Wege zu erreichen, wird das Papier über sogenannte Trockenzylinder geführt und zusätzlich über außen liegende Siebe, welche ein Ausdampfen des im Papier gespeicherten Wassers er-

möglichen, an diese angepresst. Diese Metallzylinder werden durch das Einströmen von überhitztem Dampf, der bis zu 200 °C erreicht, kontinuierlich beheizt.



**Abbildung 2-4: Modell eines Trockenzylinders**

Der Wasserdampf dient somit als Energieträger für die Trocknung der Papierbahn. Der Dampf im Inneren des Zylinders gibt seine Wärme an den Zylindermantel und dieser wiederum an die Papierbahn ab. Durch diesen Wärmestrom wird einerseits der Papierbahn thermische Energie zur Trocknung zugeführt, andererseits dem Dampf entzogen. Dies hat zur Folge, dass der Dampf im Zylinder kontinuierlich kondensiert. Das anfallende Kondensat bildet im Zylinder einen Sumpf bzw. bei entsprechend hoher Rotationsgeschwindigkeit einen Kondensat-Ring an der inneren Mantelfläche. Zwischen diesen beiden Extremfällen können aber auch unterschiedliche Mischformen des Kondensats auftreten. Um diesem Wasserring, welcher den Wärmestrom vom Dampf zur äußeren Mantelfläche bedeutend beeinflusst, entgegen zu wirken bzw. diesen zu unterbrechen, werden sogenannte Störleisten an der Innenseite des Trockenzylinders montiert.



**Abbildung 2-5: Störleisten im Trockenzylinder [4]**

Es stellt sich nun die Frage, welches tatsächliche Verhalten, vor allem jenes des Kondensates, tritt im Inneren eines bedampften Zylinders auf. Dies gilt es zu erforschen, um somit Aufschluss über die Thermodynamik in Trockenzylindern zu erhalten.

## 2.2 Die Kondensat-Niveau-Messung

Aufgrund der wesentlichen Beeinflussung des Wärmestromes durch das isolierend wirkende Kondensat ist es aufschlussreich, das Kondensat-Niveau sowie Niveau-Änderungen bei Rotation eines Trockenzylinders zu erfassen und darzustellen. Demzufolge wurde ein Trockenzylinder konstruiert, welcher unter realen Verhältnissen arbeitet und diesbezüglich herangezogen werden soll.

Da die wesentliche Problematik beim Einsetzen diverser Messgeräte und Sensorik innerhalb des Zylinders die auftretende Temperatur, die bis zu 200 °C betragen kann, darstellt, wurde folglich ein Messprinzip angedacht, welches ein Messen des Kondensat-Niveaus außerhalb des Zylinders ermöglicht.

### 2.2.1 Das Schauglasmessprinzip

Um eine Kondensat-Niveau-Messung an der Außenseite des Trockenzylinders zu realisieren, wurde der Trockenzylinder an einer Stirnseite mit mehreren axialen Bohrungen im Bereich der inneren Mantelfläche versehen. Durch diese Bohrungen soll das Kondensat-Verhalten nach dem Prinzip eines kommunizierenden Gefäßes nach außen übertragen werden. An der Außenseite werden spezielle Schaugläser mit Skalen montiert, an welchen sich das Kondensat-Niveau abbildet und sowohl visuell als auch elektronisch gemessen werden soll. Messsignale der kontinuierlichen elektronischen Niveau-Messung werden mittels einer WLAN-Sendeeinheit an einen Rechner übertragen und ausgewertet, um dort einen zeitlichen Verlauf des Kondensat-Verhaltens abzubilden.

## 2.3 Versuchsaufbau – Schauglasmessung

Dieses Schauglasmessprinzip samt elektronischer Niveau-Erfassung und WLAN-Datenübertragung wurde im Zuge dieser Diplomarbeit erstmalig an einem Versuchszylinder umgesetzt und untersucht.

Als Aufbaubasis für den Versuchsaufbau Schauglasmessung konnte ein bestehender Kunststoffzylinder, welcher ebenfalls mittels Elektromotor rotiert werden kann, verwendet werden.





**Abbildung 2-6: Aufbaubasis für Versuchszylinder**

Dieser musste mit entsprechenden Anbauten versehen werden, womit ein Kondensat-Verhalten simuliert und das Schauglasmessprinzip aufgebaut und untersucht werden kann.

Zur Verifizierung der Funktion und Qualität dieses Messverfahren war an diesem Versuchsaufbau ein zweites Messprinzip, welches ebenfalls Aufschluss über das Kondensat-Verhalten gibt, erforderlich.

Auch die mit dem Referenzmessprinzip ermittelten Messerwerte bezüglich Kondensat-Verhalten mussten mit der WLAN-Sendeeinheit an den Rechner übertragen werden können, um somit einen Vergleich der beiden Messverfahren herbeizuführen und Auskunft über Funktionalität und Qualität des elektronischen Schauglasmessprinzips zu erhalten.

## 3 Versuchsaufbau – Schauglasmessung

Die Ausführung und erstmalige Umsetzung des Schauglasmessprinzips an einem Versuchszylinder wird im folgenden Kapitel vorgestellt. Zum einen wird ein Überblick der konstruktiven Tätigkeiten bei der Abwicklung des Projektes gegeben, zum anderen wird die Umsetzung bezüglich Messtechnik und Datenübertragung beschrieben. In weiterer Folge werden die Montagetätigkeiten beim Zusammenbau des Versuchszylinders gezeigt. Auch die Inbetriebnahme sowie Erkenntnisse der ersten Datenübertragung und der damit verbundene Optimierungsbedarf sind Teil dieses Kapitels. Letztlich wird die umgesetzte Messsignalauswertung vorgestellt.

### 3.1 Konstruktion - Umsetzung

#### 3.1.1 Konstruktion Versuchszylinder

Um die Messumgebung am Versuchszylinder möglichst gleich zu jener am real bedampften Trockenzylinder auszuführen und somit unterschiedliches Kondensat-Verhalten zu vermeiden, wurde der Versuchszylinder-Durchmesser analog zum dampfbeheizten Trockenzylinder-Durchmesser gewählt. Somit hatte der Mantel des Versuchsaufbaus einen Innendurchmesser von 1754 mm, die effektive Länge wurde mit 285 mm festgelegt.

Nach diversen Überlegungen bezüglich der Werkstoffausführung wurde die Konstruktion aus Kostengründen von einer ursprünglich vorgesehenen reinen Kunststoffvariante in eine Kunststoff/Stahl-Variante abgeändert und angepasst. Die beiden stirnseitigen Kunststoffringe (Abb. 3-1 Nr.1) wurden mit einer Nut versehen, in welche der Stahlring (Abb. 3-1 Nr.2) eingesteckt werden kann und somit diese Bauteile miteinander verbunden sind. Mittels Gewindestangen und Muttern (Abb. 3-1 Nr.3) ist der dreiteilige Versuchsaufbau zusammengeschraubt. Des Weiteren wurden entsprechende Befestigungsbohrungen zur Montage des Versuchszylinders am Basis-Kunststoffzylinder sowie die nötigen Bohrungen für das Schauglas und das Referenzmesssystem eingeplant. Aufgrund des exzentrisch zur Drehachse befestigten Schauglases und der bei Rotation resultierenden Unwucht wurden Massenausgleichsgewichte (Abb. 3-1 Nr.4) aus Stahl vorgesehen.

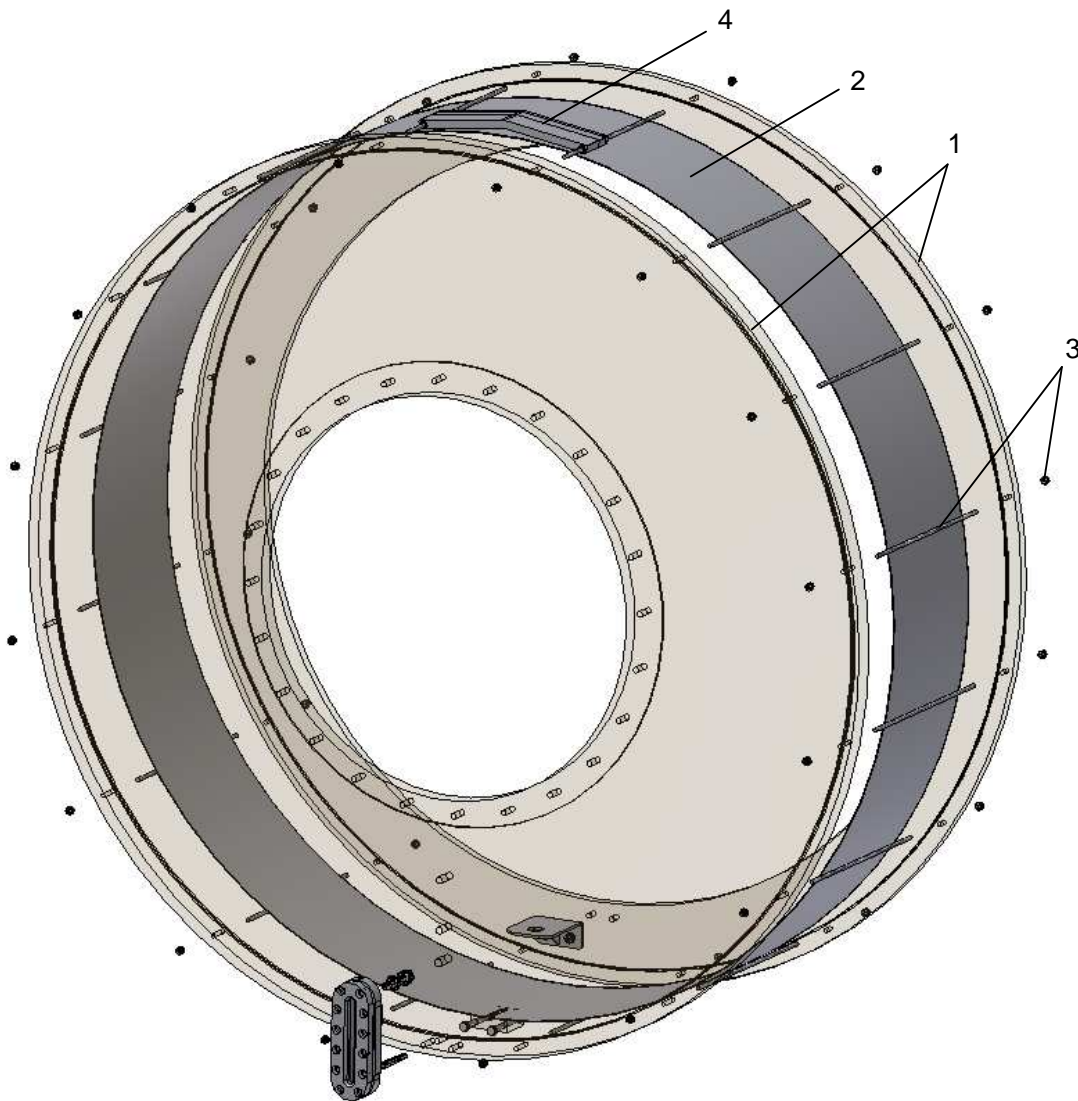


Abbildung 3-1: Konstruktion Versuchsaufbau

### 3.1.2 Schauglasbefestigung

Aufgrund der bei Rotation auftretenden Fliehkraft des Schauglases wurde mit dessen Befestigungsbolzen eine Festigkeitsberechnung durchgeführt.

#### 3.1.2.1 Berechnung des Befestigungsbolzen

Hierbei wurde vorerst die Fliehkraft des 5,5 kg schweren Schauglases bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 1500 m/min bestimmt. Der Schwerpunkt des Schauglases liegt dabei 800 mm von der Drehachse entfernt. In weiterer Folge wurden die Spannungen im Befestigungsbolzen, welcher einer Biege-Beanspruchung ausgesetzt wird, errechnet.

Berechnung der Fliehkraft:

$m = 5,5kg$  Masse des Schauglases

$v = 1500m/min$  Geschwindigkeit des Versuchszyinders

$r = 800mm$  Radius, Schauglasschwerpunkt zu Drehachse

$$F_Z = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad F_Z = \frac{5,5kg \cdot \left(\frac{1500 \frac{m}{min}}{60}\right)^2}{0,8m} \quad F_Z = 4297N$$

Berechnung des Biegemoments:

$F_Z = 4297N$  Fliehkraft

$l = 32mm$  Normalabstand

$$M_B = F_Z \cdot l \quad M_B = 4297N \cdot 0,032m \quad M_B = 137,5Nm$$

Berechnung des axialen Widerstandsmoments:

$D = 25mm$  Außendurchmesser des Bolzens

$d = 10mm$  Innendurchmesser des Bolzens

$$W_{ax} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D^4 - d^4)}{D} \quad W_{ax} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{((25mm)^4 - (10mm)^4)}{25mm} \quad W_{ax} = 1494,7mm^3$$

Berechnung der Biegespannung:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_{ax}} \quad \sigma_B = \frac{137500Nm}{1494,7mm^3} \quad \sigma_B = 92 \frac{N}{mm^2}$$

Die Festigkeitsberechnung ergab, dass die Spannungen im Befestigungsbolzen grundsätzlich zulässig sind. Trotzdem wurde aus Sicherheitsgründen eine Konsole vorgesehen, welche die Zentrifugalkraft des Schauglases aufnimmt.

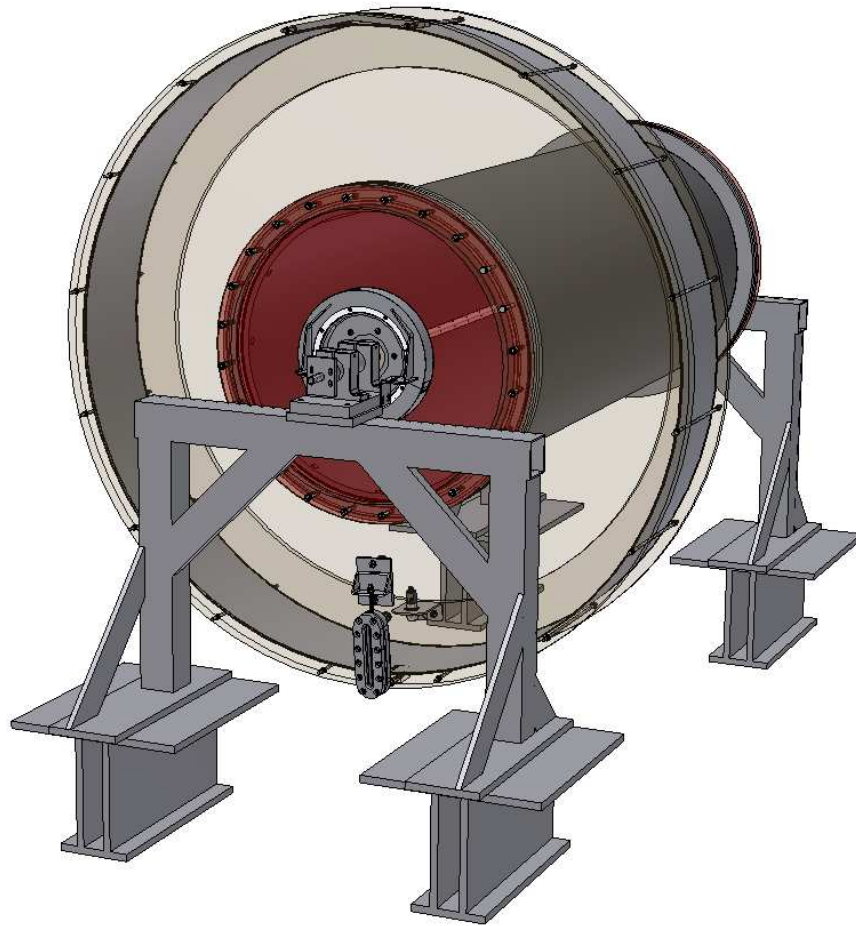


Abbildung 3-2: Zylinder mit Versuchsaufbau

### 3.1.3 Schauglasmessung

#### 3.1.3.1 Aufbau

Überlegungen bezüglich der Umsetzung der elektronischen Schauglasmessung brachten letztendlich folgende Realisierung. Das Schauglas sollte an der Rückseite möglichst kleine Bohrungen mit einem definierten Bohrbild erhalten. Durch jede dieser Bohrungen wird ein dünnes einpoliges Kabel in das Innere des Schauglases gesteckt und stellt somit einen Füllstandmesspunkt im Schauglas dar. Jedes dieser einzelnen Messkabel wird mit einem separaten Füllstandschalter verbunden. Da der Messraster, mit dem das Flüssigkeits-Niveau gemessen werden soll, mit einem Abstand von 2 mm und der Messbereich mit ca. 35 mm festgelegt wurde, ergab dies für den Versuchsaufbau eine Anzahl von 18 Niveau-Schaltern.

(Der endgültige Messaufbau wurde ohne Füllstandschalter umgesetzt. Die Abänderung und Optimierung wird unter Kapitel 3.3.3 sowie Kapitel 3.5.2 beschrieben.)



**Abbildung 3-3: Schauglas bzw. Schauglasrückseite mit Messbohrungen**

### **3.1.3.2 Funktionsweise**

Wird ein Füllstandschalter an seinen Messeingängen durch die Messkabel elektrisch verbunden, so schaltet ein Relais und legt an seinem Ausgangspin elektrisches Potential an. Jeweils ein Messeingang von jedem Füllstandschalter ist mit der untersten Messleitung im Schauglas verbunden. Somit schaltet das Relais eines Niveau-Schalters genau dann, wenn der Füllstand im Schauglas die Messleitung seines zweiten Messeinganges erreicht und diese somit elektrisch verbindet. Die 18 Ausgangssignale werden zu einer Sendeeinheit geführt, mittels WLAN-Verbindung an einen Router gesendet und an dem damit verbundenen PC ausgewertet.

### **3.1.3.3 Erforderliche Abklärungen**

Vorerst musste ein geeignetes Kabel, welches als Messleitung beim Schauglas eingeklebt werden kann, bestimmt werden. Die Anforderungen an das Kabel waren eine Hochtemperaturbeständigkeit sowie Resistenz gegen Wasserdampf und Überdruck bis zu 12 bar, da das Messkabel auch am real arbeitenden Trockenzylinder zum Einsatz kommt.

Weiters musste eine Fertigungsmöglichkeit gefunden werden, um Bohrungen mit einem max. Durchmesser von 1 mm in die 13 mm dicke Schauglasrückseite aus Edelstahl fertigen zu können. Anstelle einer herkömmlichen Bearbeitung wurde hierfür ein Wasserstrahl-Schneidverfahren angewendet.

### 3.1.4 Referenzmessprinzip

#### 3.1.4.1 Aufgabe des Messprinzips

Um das Schauglasmessprinzip auf richtige Funktionalität prüfen zu können, war es notwendig am Versuchszylinder-Aufbau ein Vergleichsmessprinzip zu realisieren. Diesbezüglich wurde ein geeigneter Sensor gesucht, welcher Niveau-Änderungen von Wasser richtig erkennt und entsprechende Messwerte liefert.

#### 3.1.4.2 Auswahlkriterien

Es gibt einige Sensoren, welche zur Distanzmessung geeignet sind, wie z.B. Ultraschallsensoren. In diesem Fall war die Problematik jedoch, dass ein Großteil der Hersteller nicht garantieren konnte, ob es beim Messen der Distanz auf eine Wasseroberfläche zu richtigen Messergebnissen kommt. Zudem kann die Wasseroberfläche Wellen aufweisen, wodurch ein optimaler Winkel der Reflexionsoberfläche nicht vorhanden ist.

Des Weiteren wurde die Suche nach dem richtigen Sensor durch andere Gegebenheiten erschwert. Es war unter anderem zwingend erforderlich, dass dem Sensor eine Versorgungsspannung von 12 V ausreicht, da die Füllstandschalter sowie die WLAN-Sendeeinheit ebenfalls eine 12 V-Versorgungsspannung benötigen. Um die Messwerte des Sensors ebenfalls mit derselben Sendeeinheit übertragen zu können, war es zudem erforderlich, einen Sensor mit einem analogen Spannungs-Ausgangssignal zu finden, da die Sendeeinheit ausschließlich zum Übermitteln von Spannungssignalen geeignet ist.

#### 3.1.4.3 Ultraschallsensor

Letztlich wurde ein Ultraschallsensor gewählt, welcher bei Distanzmessungen, unter anderem auch bereits bei Wasser, zum Einsatz kommt und auch den restlichen Anforderungen gerecht wird.

Technische Daten:

Bezeichnung: Microsonic mic+25/IU/TC

Messbereich: 30 mm – 250 mm, einstellbar

Versorgungsspannung: 9 V – 30 V DC

Ausgangssignal: Strom: 4 mA – 20 mA / Spannung: 0 V – 10 V

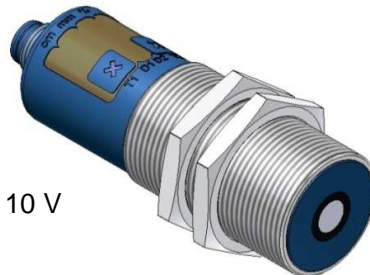


Abbildung 3-4: Ultraschallsensor mic+25/IU/TC [5]



### 3.1.5 Elektrischer Messaufbau

(Der endgültige Messaufbau wurde ohne Füllstandschalter umgesetzt. Die Abänderung und Optimierung wird unter Kapitel 3.3.3 sowie Kapitel 3.5.2 beschrieben.)

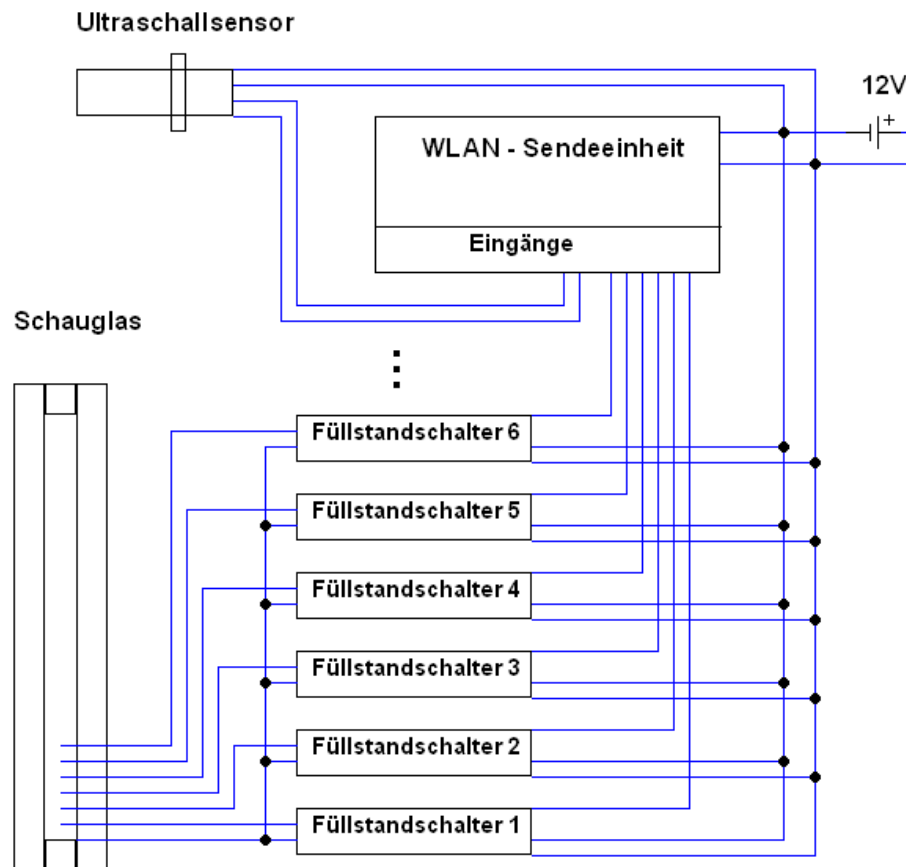


Abbildung 3-5: Elektrischer Messaufbau

### 3.1.6 Spannungsversorgung / Schleifring

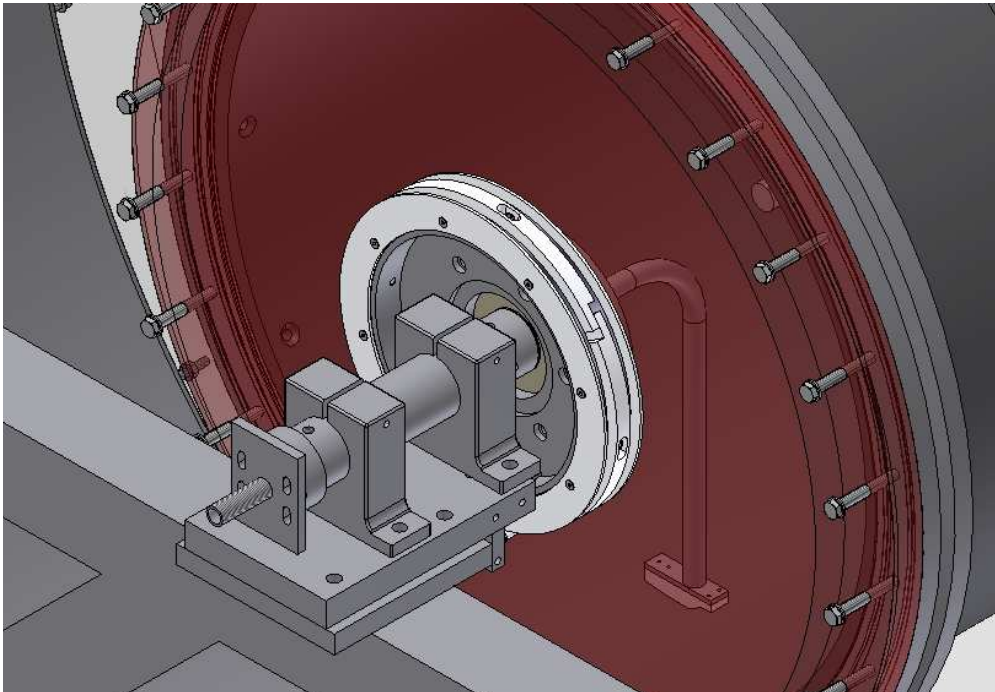
Aufgrund der benötigten Spannungsversorgung für Sendeeinheit, Füllstandschalter und Ultraschallsensor am rotierenden Zylinder war die Anwendung eines zweipoligen Schleifringes unumgänglich. Dabei stellte die Entwicklung und Beschaffung dieser Bauteile eine Herausforderung dar.

#### 3.1.6.1 Ausführung des Schleifringes

Da ein derartiger Schleifring nicht nur am Versuchszylinder, sondern auch am realen Trockenzylinder benötigt wird, musste die Konstruktion so angepasst werden, dass er an



beiden Einrichtungen verwendet werden kann. Aus den Entwürfen folgte eine konkrete Schleifringkonstruktion, welche für beide Anwendungsfälle als konstruktionsgerecht erschien. Als Träger- und somit als Isolationsmaterial zwischen den beiden Edelstahl - Schleifringen wurde PTFE gewählt, da es gute elektrische Isoliereigenschaften besitzt und schnell mit den benötigten mechanischen Bearbeitungen verfügbar war. Geeignete Kohlebürsten samt passender Kohlebürstenhalter wurden festgelegt und beschafft.



**Abbildung 3-6: Schleifring am Versuchszylinder**

Erst nach genauerer Absprache bezüglich Einbauposition und deren Umgebungsbedingungen am real arbeitenden Trockenzylinder wurde klar, dass die Umgebungstemperatur bis zu 160 °C sein kann und somit die Konstruktion des Schleifringes in Verbindung mit dem vorgesehenen Material nicht zum Einsatz kommen darf. PTFE ist relativ gut temperaturbeständig, dehnt sich aber um das Zehnfache im Bezug zum Zylinderzapfen aus Sphäroguss, auf dem der Schleifring am Trockenzylinder befestigt wird.

Somit wurde nach einem isolierenden Kunststoff gesucht, der über einen ähnlichen Wärmeausdehnungs-Koeffizient verfügt. Es gibt Kunststoffe, deren Wärmeausdehnung wesentlich kleiner als jene von PTFE ist, wie z.B. faserverstärkte Kunststoffe. Allerdings liegt auch bei diesen Materialien die Wärmeausdehnung in einem Bereich, der nicht toleriert wurde. Zudem lagen die Kosten bei derartigen Werkstoffen bei einem Vielfachen im Vergleich zur Ausführung aus PTFE.

MATERIAL:	WÄRMEAUSSDEHNUNGSKOEFFIZIENT:	KOSTEN:
Sphäroguss [6]	$12,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	-
PTFE [7]	$120 - 130 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	100%
Faserverstärkter Kunststoff PEEK GF30 [8]	$30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	370%

Tabelle 3-1: Sphäroguss- / Kunststofftabelle

Anschließend wurde bei einigen Firmen ein passendes Lösungskonzept angefragt bzw. Informationen eingeholt, welche Materialien normalerweise auf diesem Gebiet unter derartigen Umgebungsbedingungen zum Einsatz kommen. Aber auch dieser Ansatz scheiterte, da zumeist die Kosten für eine eigens entwickelte Konstruktion bei einer Abnahmemenge von 2 Stück unrentabel waren, spezielle Materialien sind schwer beschaffbar und ebenfalls sehr teuer.

Im nächsten Schritt folgten Überlegungen bezüglich einer Änderung der Konstruktion. Da die wesentliche Problematik bei der Ausführung aus PTFE die enorme Ausdehnung des Kunststoffes darstellt, wurde versucht eine Lösung zu finden, die dieses Verhalten erlaubt. Folglich wurde der T-förmige Isolatorring zweigeteilt und ein entsprechender Spalt an beiden Trennstellen vorgesehen, um sich bei Erwärmung in Umfangsrichtung ausdehnen zu können.

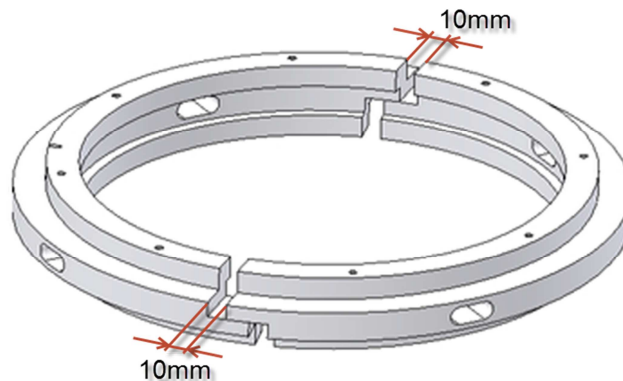


Abbildung 3-7: Zweigeteilter Isolatorring

### 3.1.6.2 Berechnung der Wärmeausdehnung des Schleifringes

Für die Berechnung der thermischen Ausdehnung des PTFE-Schleifringes wurde mit einem Wärmeausdehnungs-Koeffizient von  $130 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  gerechnet. Es wird von einem Temperaturbereich von 20 °C bis 180 °C, also einen maximalen Temperaturunterschied von 160 °C ausgegangen. Der mittlere Durchmesser des Schleifringes beträgt 300 mm.

Berechnung der Ausdehnung in Umfangsrichtung:

$$\alpha = 130 \cdot 10^{-6} K^{-1} \quad \text{Wärmeausdehnungs-Koeffizient}$$

$$\Delta t = 160^{\circ}C \quad \text{max. Temperaturunterschied}$$

$$d = 300mm \quad \text{Durchmesser des Schleifringes}$$

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad \Delta l = 300mm \cdot \pi \cdot 130 \cdot 10^{-6} K^{-1} \cdot 160K \quad \Delta l = 19,6mm$$

Der Berechnung zufolge wurde ein Spaltabstand von 10 mm pro Teilung zur Ausdehnung vorgesehen.

### 3.1.6.3 Befestigung des Schleifringes

Nun galt es eine Befestigungsmöglichkeit des zweigeteilten Ringes zu finden. Dies wurde letztendlich folgendermaßen gelöst:

Der geteilte Isolatorring wurde zusätzlich am Innendurchmesser, mittig, mit Längsnuten (Abb. 3-8 Nr.1) in Umfangsrichtung versehen. Diese Nuten werden bei der Montage mit vier 80°Ringsegmenten (Abb. 3-8 Nr.2), welche jeweils eine Gewindebohrung aufweisen, bestückt. An der Außenseite des zweigeteilten Isolatorringes werden die beiden Schleifringe (Abb. 3-8 Nr.3) aufgeschoben. Somit kann der geteilte Isolatorring mittels der innen liegenden Stahl-Ringsegmente und den eingeschraubten Schrauben nach außen, gegen die beiden endlosen Schleifringe gespannt werden.

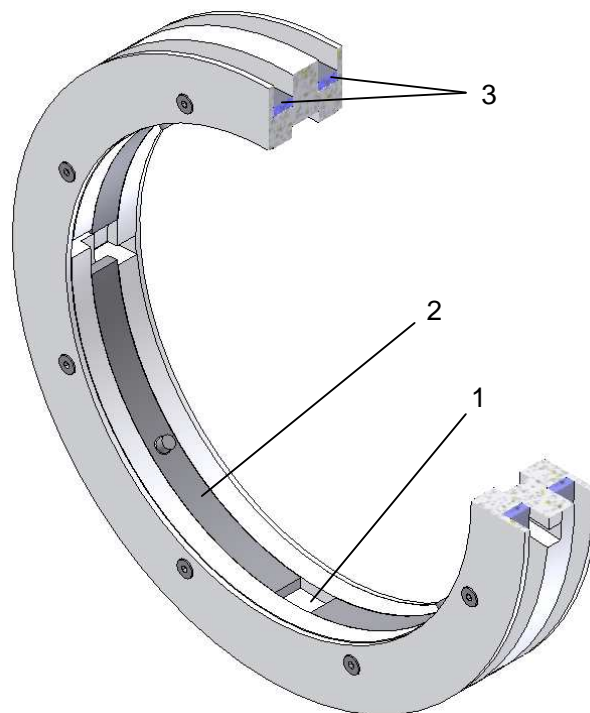


Abbildung 3-8: Schleifringkonstruktion

#### 3.1.6.4 Befestigung der Kohlebürstenhalter

Im Anschluss folgte die Konstruktion zur Aufnahme der beiden Kohlebürstenhalter. Dazu wurde eine Konsole vorgesehen, an welcher zwei Aufnahmebolzen einstellbar befestigt werden. An diesen Bolzen werden die Kohlebürstenhalter fixiert, wobei eine dazwischen liegende PTFE-Hülse einen Kurzschluss der beiden Pole unterbindet.

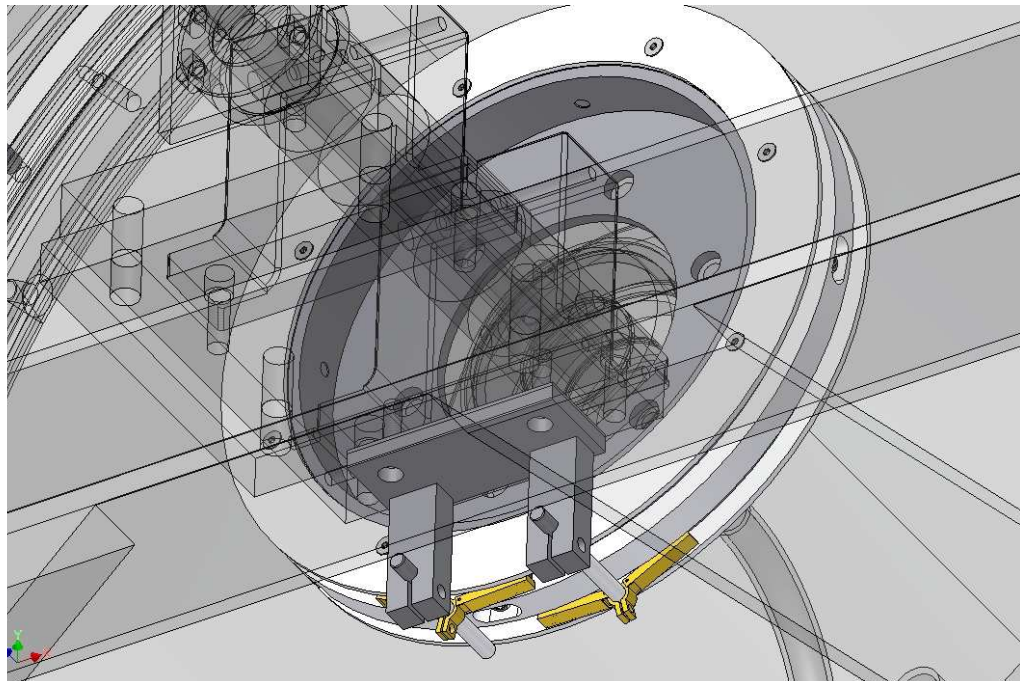


Abbildung 3-9: Schleifring mit Kohlebürstenhalter

## 3.2 Montageablauf

### 3.2.1 Montage Versuchsaufbau

Die ersten manuellen Arbeiten waren das Demotieren nicht benötigter Einrichtungen am bestehenden Versuchszylinder.

Anschließend wurde begonnen, den neu konstruierten Versuchsaufbau, welcher im Wesentlichen aus zwei Kunststoffscheiben und einem Edelstahlmantel besteht, zusammenzuschrauben und wie vorgesehen zu verkleben. Dazu wurden die beiden Nuten in den Kunststoffringen mit geeignetem Dichtungsklebstoff gefüllt und anschließend die dreiteilige Baugruppe zusammengefügt. Nachfolgend wurde diese mit den vorgesehenen Gewindestangen und Muttern verschraubt.





**Abbildung 3-10: Verschrauben des Versuchsaufbaus**

Im nächsten Schritt folgte die Montage dieser vormontierten Baugruppe am bestehenden Versuchszylinder. Dazu musste vorerst das Gestell, auf dem der frontseitige Lagerbock befestigt ist, demontiert und der bestehende Zylinder auf Holzstaffeln abgelegt werden. Im Anschluss wurde der Versuchsaufbau mit einem Hubgerät zum Zylinder transportiert, am bestehenden frontseitigen Deckel aufgesetzt und gemeinsam mit diesem an den vorhandenen Befestigungsbohrungen festgeschraubt.



**Abbildung 3-11: Zylinder samt Versuchsaufbau**

### 3.2.2 Arbeiten zur Messelektronik

Als nächstes wurde begonnen, das Schauglas mit den nötigen Messkabeln zu versehen. 19 Messleitungen wurden von der Hinterseite durch das Schauglas gesteckt und mit geeignetem Kleber abgedichtet.

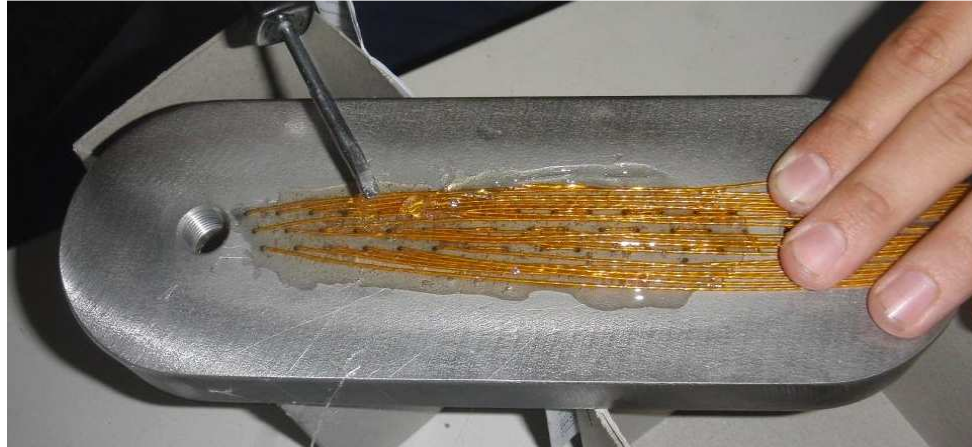


Abbildung 3-12: Einkleben der Messleitungen

Im Anschluss folgte das Ablängen und Zurechtbiegen der Messleitungen im Inneren des Schauglases, um den gewünschten Messabstand der einzelnen Messpunkte zu gewährleisten. Zusätzlich wurden alle Kabel nummeriert und anschließend eine Blechhaube über die Schauglasrückseite samt Messleitungen gezogen.

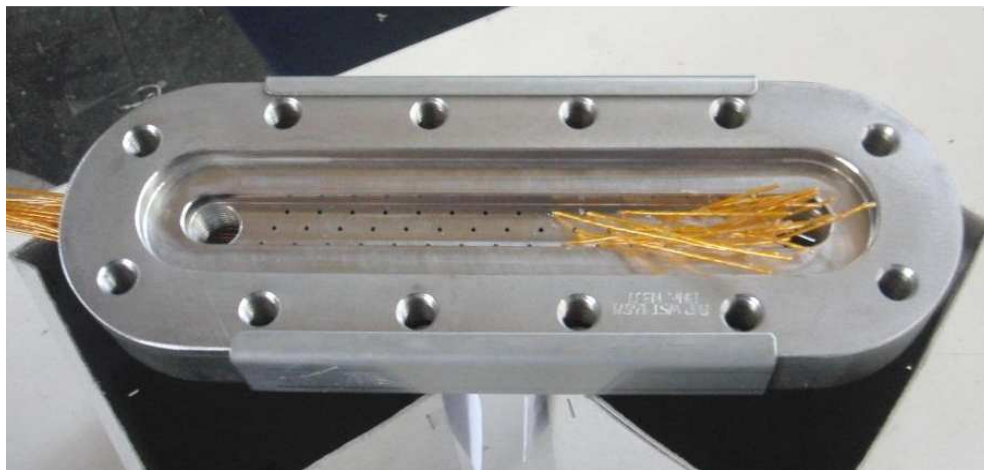
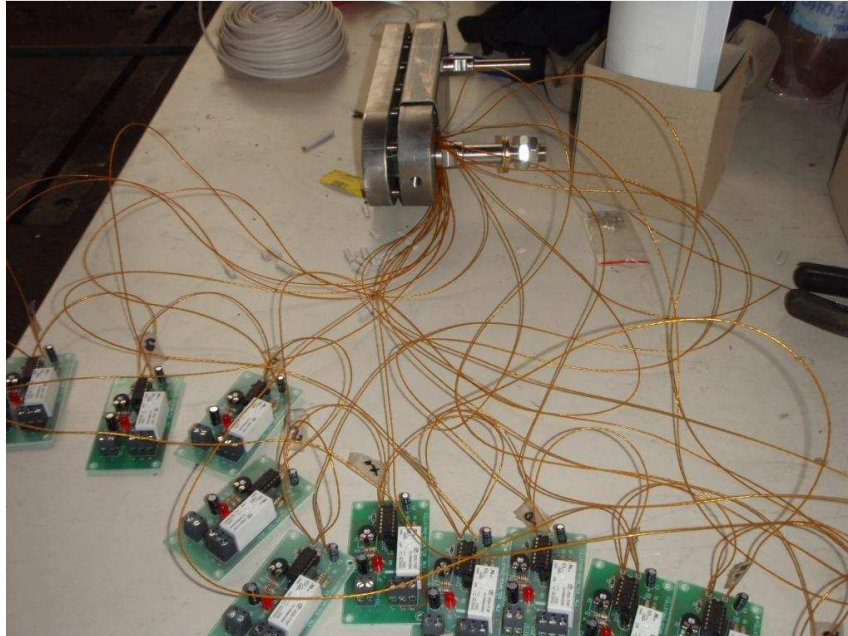


Abbildung 3-13: Messleitungen im Inneren des Schauglases

Nun folgte das Zusammenlöten von 18 Stück Füllstandschaltern, welche als Bausatz geliefert werden. Um die Funktion der gelöteten Füllstandschalter sicherzustellen, wurden diese einzeln einem Funktionstest unterzogen.

Anschließend war die Verkabelung der Schalter. Zum einen musste jeder eine Spannungsversorgung erhalten, zum anderen erfolgte das Anlöten der Messleitungen vom Schauglas an den Füllstandschaltern.

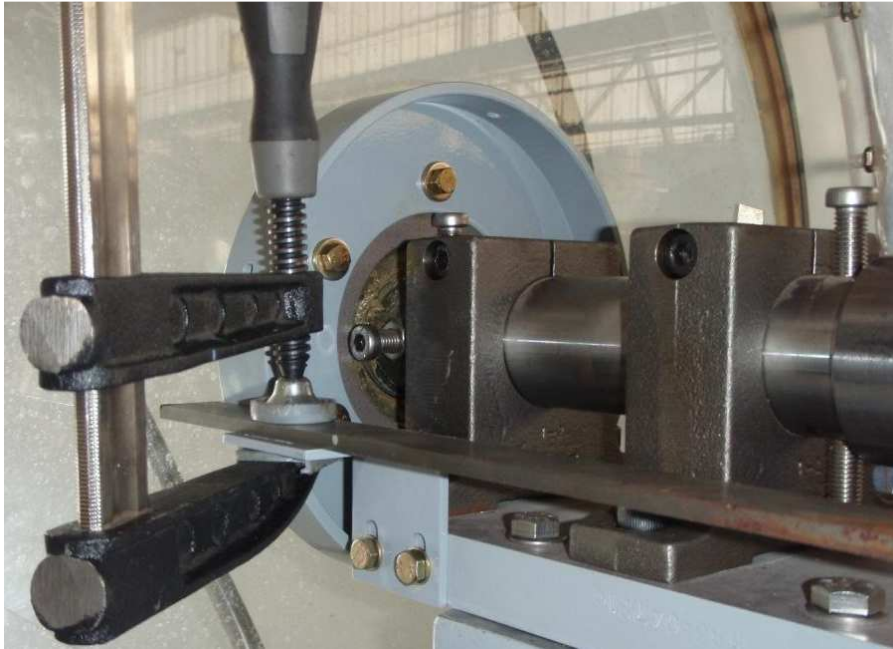


**Abbildung 3-14: Verkabelung der Füllstandschalter**

### 3.2.3 Montage Zwischenring

Als nächstes folgte die Montage des Zwischenringes, auf welchem in weiterer Folge der Schleifring befestigt wird. Dieser Adapterring wurde mit den Klemmflanschen, welche das Pendelrollenlager im Zylinderdeckel zentrieren, mitgeschraubt. Dazu wurden die bestehenden Schrauben durch neue, längere, ersetzt. Da am Ring keine passende Zentrierung vorgesehen werden konnte, wurde eine zentrische Positionierung zur Drehachse bestmöglich ausgemessen.

Anschließend wurde das demontierte Gestell unterhalb des frontseitigen Lagerbockes wieder montiert und lagerungsgerecht ausgerichtet. Nun konnte auch der Rundlauf des zuvor montierten Zwischenringes kontrolliert werden.



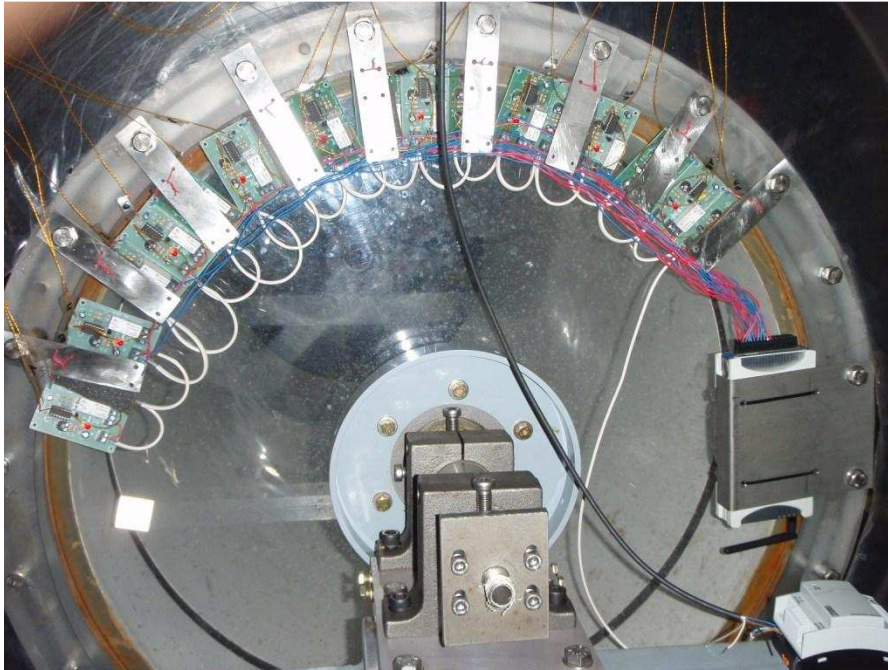
**Abbildung 3-15: Rundlaufkontrolle Zwischenring**

### **3.2.4 Montage der Messelektronik**

Im nächsten Schritt wurde das Schauglas samt den verkabelten Füllstandschaltern sowie die WLAN-Sendeeinheit am Versuchsaufbau befestigt. Die Schaltausgänge der 18 Niveau-Schalter wurden mit je einem Signaleingang der Sendeeinheit verbunden. Auch der Ultraschallsensor wurde nun am Versuchsaufbau festgeschraubt und seine beiden Ausgangssignalkabel zur Sendeeinheit geführt.

Im Anschluss wurde ein erstmaliger Test der Füllstandschalter sowie des Ultraschallsensors durch Anschließen der jeweiligen Versorgungsleitungen direkt am 230 V/12 V-Transformator durchgeführt. Da alle LED der 18 Schalter sowie die Digitalanzeige am Sensor leuchteten, zeigte dies eine fehlerlose Spannungsversorgung dieser Messinstrumente.





**Abbildung 3-16: Messelektronik am Versuchsaufbau**

### 3.2.5 Schleifring und Kohlebürstenhalter

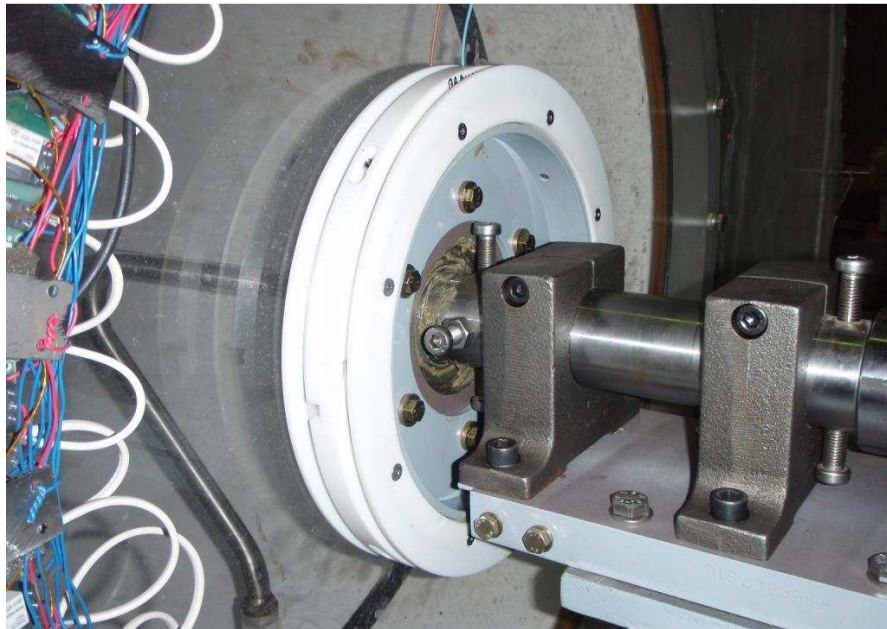
In weiterer Folge fand der Zusammenbau des Schleifringes statt. Vorerst musste an den beiden Edelstahl-Schleifringen jeweils ein Kabel, das später als Spannungsversorgung diente, angelötet werden. Es zeigte sich, dass dies ohne Flussmittel mit dem vorerst zur Verfügung stehenden Lötzinn nicht möglich war. Erst nach Beschaffung von Flussmittel und Spezialzinn gelang eine ausreichend gute Lötverbindung.

Folglich konnte nun der Schleifring zusammengebaut werden, wobei der Kunststoffisolator teilweise einer Nachbearbeitung unterzogen werden musste.



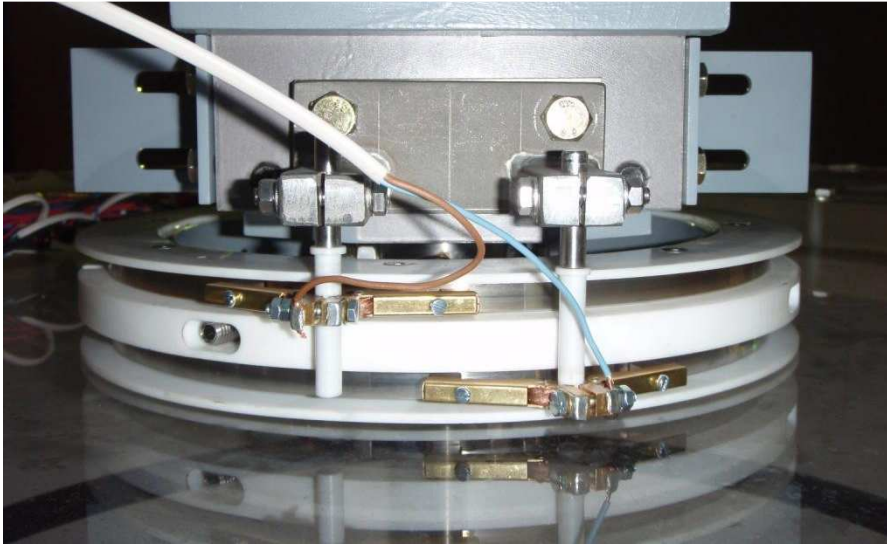
**Abbildung 3-17: Zusammenbau Schleifring**

Im Anschluss wurde versucht, den zusammengebauten Schleifkörper auf den bereits montierten Zwischenring am Versuchszylinder aufzuschieben. Auch dies bereitete vorerst Schwierigkeiten und konnte erst nach erneuter manueller Nachbearbeitung des Kunststoffringes sowie der Spannsegmente durchgeführt werden. Anschließend wurden die vorgesehenen Gewindestifte von außen in die Spannsegmente des Schleifringes eingedreht und dieser somit fixiert.



**Abbildung 3-18: Schleifring am Versuchszylinder**

Folglich wurde nun die Montage der Kohlebürstenhalter umgesetzt. Zu Beginn erfolgte die Befestigung der beiden Aufnahmebolzen an der vorgesehenen Konsole. Anschließend wurden die isolierenden PTFE-Hülsen aufgeschoben und die Kohlebürstenhalter montiert. Darauf folgend wurde die vormontierte Baugruppe an den vorgesehenen Bohrungen am frontseitigen Gestell des Zylinders befestigt und die beiden Kohlebürstenhalter mittig zur jeweiligen Schleifbahn ausgerichtet.



**Abbildung 3-19: Schleifring und Kohlebürstenhalter**

Es folgte die Verkabelung der Spannungsversorgung unter Verwendung des Schleifringes. Die am Schleifring angelöteten Versorgungskabel wurden mit dem Ultraschallsensor, den Füllstandschaltern und der Sendeeinheit verbunden. Des Weiteren wurde eine Spannungsversorgung vom 230 V/12 V-Transformator zu den Schleifbürsten umgesetzt.

Ein elektrischer Funktionstest zeigte erneut eine korrekte Spannungsversorgung der einzelnen Komponenten sowie einen funktionierenden Schleifring.

### **3.2.6 Antriebsriemen und Sicherheitseinrichtungen**

Vor dem ersten Rotationsversuch war es erforderlich, den Antriebsriemen zu verlängern, da der Versuchszylinder aufgrund neuer Zwischenplatten um 30 mm höher positioniert ist.

In weiterer Folge wurde die Konsole zur Aufnahme der radialen Fliehkräfte des Schauglases am Versuchsaufbau befestigt und diese mit der Gewindestange zum Schauglas verschraubt. Letztlich konnten auch die vorgesehenen Schutzabdeckungen, zum einen am Umfang des Rotationskörpers, zum anderen als Eingreif- und Spritzschutz zum Schleifring, montiert werden.



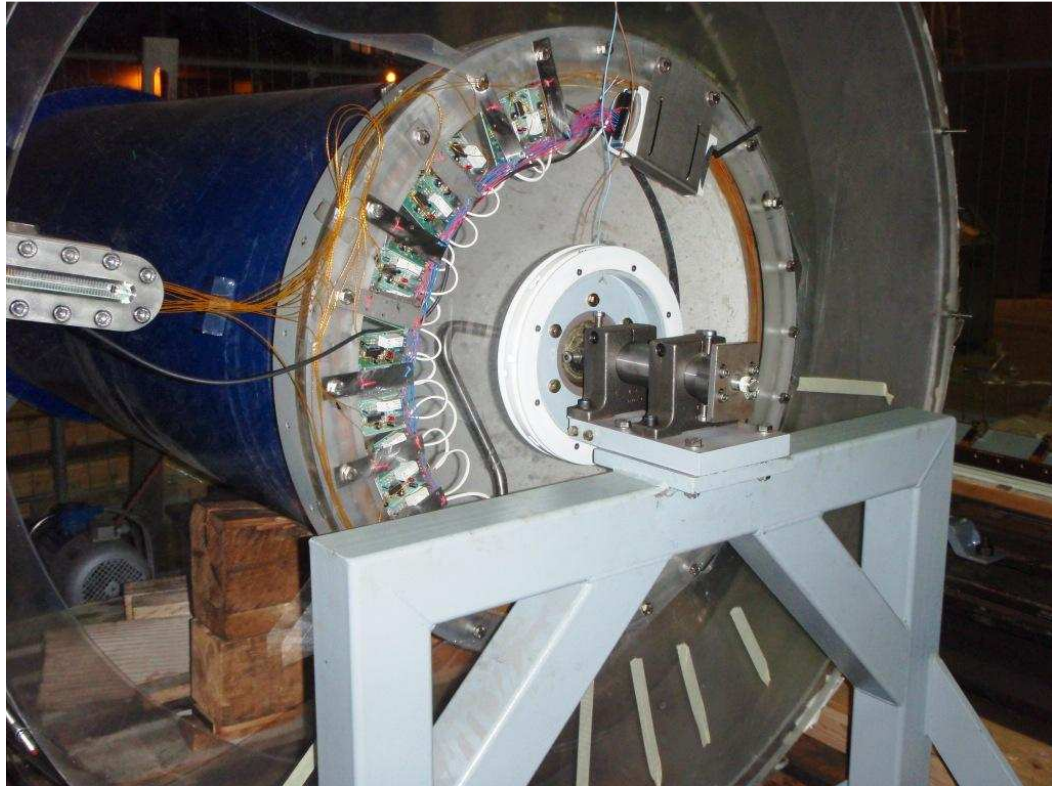


Abbildung 3-20: Versuchszyylinder

### 3.3 Probleme der Messtechnik / Optimierung

Aufgrund der Tatsache, dass die Messtechnik mit den Füllstandschaltern Probleme mit sich brachte, wurde in erster Linie versucht die Ursache zu finden. Ebenso ist das weitere Vorgehen bezüglich Messtechnik in diesem Unterkapitel erläutert.

#### 3.3.1 Ausfall der Füllstandschalter

Aus damals unerklärlichen Gründen kam es abrupt zum Ausfall der 18 Füllstandschalter. Trotz Anlegen einer entsprechenden Versorgungsspannung waren diese nicht betriebsbereit. Dies war in erster Linie durch nicht leuchtende LEDs erkennbar, aber auch das Schalten der Relais beim Anlegen einer Versorgungsspannung blieb aus. Nun galt es herauszufinden, woran das Fehlverhalten der Füllstandschalter liegen kann bzw. wie eine entsprechende Optimierung umgesetzt werden könnte.

### 3.3.2 Überprüfung der Füllstandschalter

Nach intensiver Ursachenforschung wurde als Grund für die defekten Füllstandschalter das Abziehen der Schutzfolie, welche noch auf den Kunststoffteilen des Versuchszylinders klebte, angenommen. Bei jedem Kontakt mit dem Versuchsaufbau war elektrische Entladung aufgrund statischer Aufladung zu spüren. Es wurde angenommen, dass ein oder mehrere elektrische Bauteile an jedem Füllstandschalter defekt sind. Um die betroffenen Bauteile zu bestimmen, wurden zunächst zwei der eingesetzten Niveau-Schalter ausgelötet, demontiert und mittels Messgerät durchgemessen. Ausschließlich der IC war defekt, wobei dieser nur eingesteckt ist und somit rapide ausgetauscht werden kann. Folglich wurden die beiden Schalter mit neuen IC's bestückt und deren Funktion erneut getestet. Wie erwartet waren diese somit wieder in Ordnung. Nach genauerer Betrachtung der Betriebsanleitung der Niveau-Schalter wurde dort der Hinweis gefunden, dass der IC sehr empfindlich ist und bereits durch statische Aufladung defekt werden kann.



Abbildung 3-21: IC am Füllstandschalter [9]

Somit wurde im Anschluss mit dem Austausch der IC an den noch montierten Niveau-Schaltern begonnen. Ein zwischendurch ausgeführter Funktionstest zeigte allerdings, dass nicht nur Schalter mit ausgetauschten IC, sondern auch alle weiteren wieder funktionieren. Durch anschließendes Ausstecken, Einstecken sowie Austauschen unterschiedlicher IC konnte festgestellt werden, dass nicht alle dieser Bauteile defekt sind, allerdings hat ein defekter IC alle weiteren Füllstandschalter beeinflusst und lässt diese nicht funktionsgerecht arbeiten.

Dies war Auslöser, dass gemeinsam mit elektrotechnischer Fachkraft die Funktionsweise der elektrischen Schaltung eines Füllstandschalters bestimmt wurde. Die Erkenntnisse waren, dass ein gemeinsames Fungieren mehrerer Niveau-Schalter beim derartigen Messaufbau nicht funktionieren wird. Werden mehrere Messpunkte, also Messleitungen

unterschiedlicher Füllstandschalter, im Schauglas durch Wasser elektrisch verbunden, kommt es zur gegenseitigen Beeinträchtigung der jeweiligen Füllstandschalter.

Aufgrund dieser Probleme, wurden Überlegungen bezüglich Alternativen bzw. einer Optimierung des Messaufbaus getätigt. Dabei war das Ziel ein Messprinzip zu bestimmen, welches ohne die Verwendung der Niveau-Schalter umgesetzt werden kann. Aufgrund der Tatsache, dass die Messtechnik mit den Füllstandschaltern aus genannten Gründen nicht funktioniert, wurde dieser Messaufbau nicht weiter verfolgt und stattdessen ein Messprinzip ohne Füllstandschalter umgesetzt.

### **3.3.3 Abänderung des Messprinzips**

#### **3.3.3.1 Funktionsweise der alternativen Messmethode**

Der Aufbau dieser Messmethode sieht folgendermaßen aus: Das Potential von +12 V wird über ein Potentiometer geleitet und anschließend an die unterste Messleitung am Schauglas angelegt. Alle darüber liegenden Messleitungen werden direkt mit den Eingängen der Sendeeinheit verbunden. Je nach Füllstand des Wassers im Schauglas wird das einstellbare Potential an höher liegende Messleitungen durchgeschaltet oder nicht. Mittels dieser 18 Messsignale soll somit die Kondensathöhe bestimmt werden.

#### **3.3.3.2 Umsetzung der alternativen Messmethode**

Zu Beginn wurden alle Füllstandschalter von den Messleitungen am Versuchsaufbau ausgelötet und demontiert. Im Anschluss folgte der Aufbau der neuen Messmethode. Wie vorgesehen wurde in die unterste Messleitung ein Potentiometer eingelötet und zum 12 V-Potential geführt. Alle weiteren Messkabel wurden mit dem jeweiligen Eingang der Sendeeinheit verbunden. Um den Füllstand des Schauglases auch visuell darzustellen, was vor allem bei den ersten Tests von Vorteil ist, wurde jede Messleitung mit einer LED versehen. Weiters kann auf diese Weise kontrolliert werden, ob das Schließen bzw. Öffnen der Stromkreise durch das Ansteigen bzw. Abfallen des Wasserstandes funktioniert.

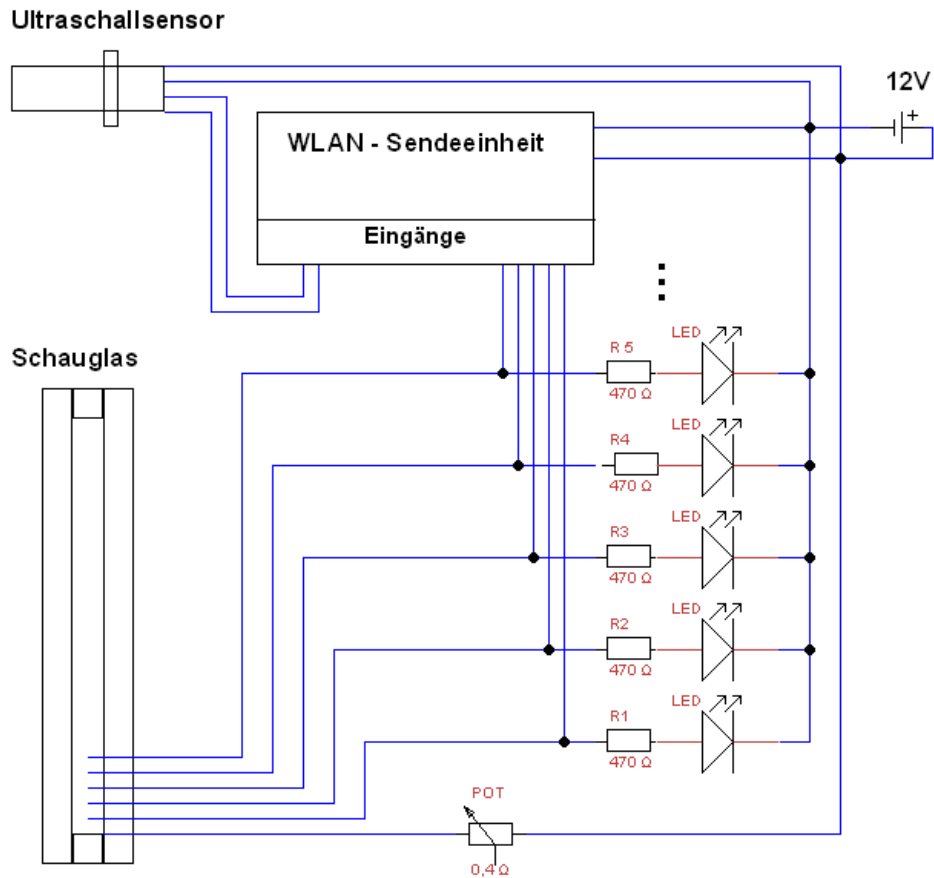


Abbildung 3-22: Abgeänderter elektrischer Messaufbau

Im Anschluss an den Aufbau dieses Messprinzips wurde erstmalig Wasser in den Versuchsaufbau geleert und die grundsätzliche Funktion kontrolliert. Da die LED, abhängig vom Wasser-Niveau leuchteten, oder eben nicht, war der aktuelle Messaufbau soweit in Ordnung.

### 3.4 Installation / Einrichten der WLAN – Verbindung

Zu Beginn wurde die Installation des Routers sowie der Datenübertragungs-Software vorgenommen. Diese Software dient zum Konfigurieren des WLAN-Sendemoduls bei vorerst verkabelter Verbindung. In weiterer Folge kann sie zum Auswerten und Darstellen der einzelnen Messsignale herangezogen werden.

Im Anschluss wurde versucht, eine Verbindung zwischen PC und Sendeeinheit über den Router mittels Netzkabel herzustellen. Nach entsprechender Anpassung der IP-Adresse am Computer konnte dies auch realisiert werden.

Darauffolgend wurde die WLAN-Konfiguration vorgenommen und erstmalig eine kabellose Verbindung hergestellt.

## **3.5 Optimierung der Messelektronik**

### **3.5.1 Erste Übertragungsergebnisse**

Nachdem das System mit übertragungsfähiger WLAN-Verbindung es nun ermöglichte, die einzelnen Spannungspotentiale der Sendeeinheit-Eingänge darzustellen, wurde dies für verwendete Kanäle umgesetzt. Dabei war der dargestellte Graph einiger Messsignale nicht nachvollziehbar. Signale von Messleitungen, die im Schauglas oberhalb des Wasser-Niveaus lagen und somit keine elektrische Verbindung zum untersten Schauglaskabel hatten, wurden mit einem schnell schwankenden Potential dargestellt. Alle weiteren Signale, deren Messleitungen im Schauglas Kontakt zum Wasser hatten, zeigten konstante und durchaus nachvollziehbare Messwerte.

### **3.5.2 Optimierung der Messsignale**

Infolge dessen wurde Rücksprache mit dem Hersteller der Sendeeinheit gehalten. Dabei wurde über das Schwanken der Spannungssignale diskutiert. Nach genauer Beschreibung des Messaufbaus konnte auch für dieses Signalverhalten eine mögliche Ursache bestimmt werden. Problem ist das undefinierte Spannungspotential an den Messleitungen, solange diese mit dem Wasser nicht in Verbindung stehen. Grundsätzlich liegen diese Messleitungen an dem 0 V-Potential, allerdings wird dies durch die Sperrrichtung der Leuchtdiode unterbrochen. Die Folge ist ein willkürliches „Treiben“ der Signale. Diesbezüglich kann jedoch durch Einlöten von Widerständen Abhilfe geschafft werden, um somit das Schwanken der Signale zu minimieren.

Folglich wurde der elektrische Messaufbau erweitert. Um den richtigen elektrischen Widerstand für eine bestmögliche Dämpfung der Amplitude zu erreichen, wurde in jede Messleitung ein Potentiometer anstatt eines herkömmlichen Widerstandes eingelötet.



## Ultraschallsensor

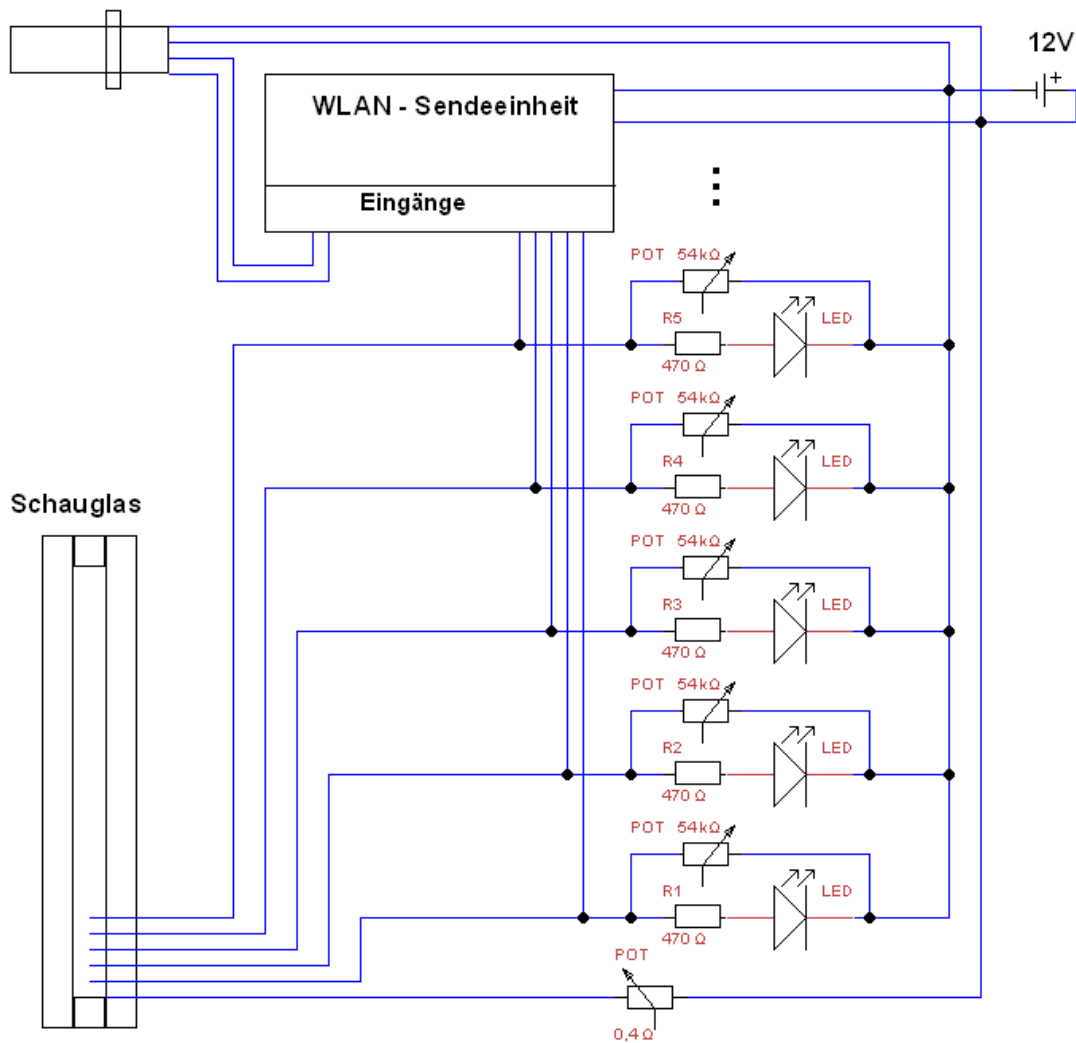
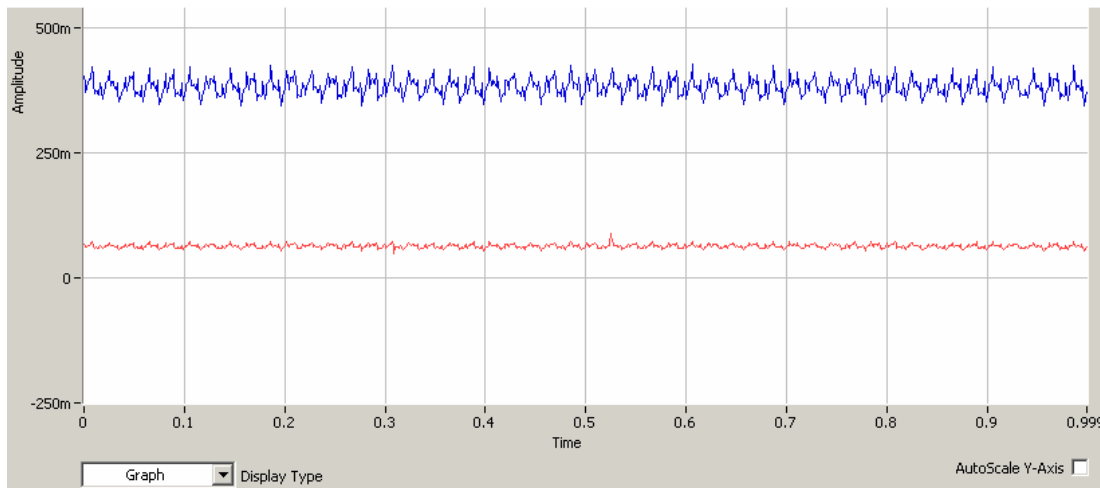


Abbildung 3-23: Messaufbau für optimierte Messsignale

Ein darauffolgender Funktionstest zeigte, je kleiner der Widerstand, umso besser die Dämpfung der Amplitude. Aber auch der Messwertsprung eines Messsignals, hervorgerufen durch das Erreichen der jeweiligen Messleitung vom Wasserfüllstand, wird dabei immer geringer. Eine vollständige Dämpfung der Amplitude ist somit ebenfalls nicht zielführend. Durch optimale Einstellung der Potentiometer können allerdings alle Messsignale so angepasst werden, dass eine Auswertung möglich ist.



**Abbildung 3-24: Signalvergleich: Mit bzw. ohne Potentiometer**

## 3.6 Auswertung der Messsignale

Aufgrund der Tatsache, dass Messergebnisse des Versuchszylinders, aber auch des reell bedampften Trockenzylinders in eine eigens vorgesehene Firmen-Software eingelesen, mit dieser ausgewertet und archiviert werden sollen, musste eine entsprechende Messsignalauswertung mit dieser Software umgesetzt werden.

Diese Software war soweit vorbereitet, dass alle Signaleingänge der WLAN-Übertragungseinheit abgegriffen und dargestellt werden konnten. Somit standen die 18 Messsignale der Schauglasmessung und 1 Messsignal des Ultraschallsensors für die Auswertung zur Verfügung. Des Weiteren bietet diese Software die Möglichkeit zur Verwendung von arithmetischen und booleschen Operatoren sowie Vergleichsoperatoren.

### 3.6.1 Auswertung der Schauglassignale

Zur Auswertung von Schauglasmesswerten war es notwendig, aus 18 analogen Spannungssignalen die Füllstandhöhe im Schauglas zu bestimmen. Dabei muss bei jedem Messsignal aufgrund des gemessenen Spannungspotentials entschieden werden, ob das Wasser den betroffenen Messpunkt im Schauglas erreicht hat. Nach Einstellung aller Potentiometer haben Versuche gezeigt, dass das Spannungspotential bei Messleitungen, die keinen Kontakt zum Wasser haben und somit nicht direkt mit elektrischem Potential beaufschlagt werden, im Bereich von 0 V bis 0,01 V liegt. Messleitungen, welche hingegen ein Spannungspotential durch Wasser übertragen bekommen, zeigen ein Potential im Bereich von 0,15 V bis 0,3 V. Folglich wurde der Grenzwert mit 0,1 V festgelegt. Dies bedeutet, wird an einer Messleitung mehr als 0,1 V gemessen, so hat der Füllstand des

Wassers diesen Messpunkt erreicht. Durch aufsummieren der einzelnen Messpunkte kann somit der Füllstand im Schauglas bestimmt werden.

Da die Messpunkte am Schauglas in einem Abstand von 2 mm angebracht sind, ist dies bei der Berechnung der Füllstandhöhe entsprechend zu berücksichtigen. Die 1. Messleitung ist auf einem Füllstand-Niveau von 0 mm angebracht und darf somit auf die Berechnung der Füllstandhöhe keinen Einfluss haben.

### 3.6.1.1 Auswertung der Schauglassignale ohne Prüffunktionen

Die einfache Berechnung des Füllstandes sieht somit folgendermaßen aus:

$$Füllst = 2 \cdot (Signal_0 > 0,1) \cdot \sum_{i=1}^{17} (Signal_i > 0,1)$$

Hierbei wird bei allen Signalen geprüft, ob deren Potential größer 0,1 V ist. Trifft dies zu, wird der Wert 1 zurückgegeben, andernfalls 0. Die Ergebnisse von Signal 1 bis Signal 17 werden addiert. Diese Summe wird mit dem Resultat der Prüfung von Signal 0 multipliziert, wodurch für einen errechneten Füllstand >0 auch die erste Messleitung Kontakt zum Wasser haben muss. Letztlich erfolgt aufgrund der Messpunktabstände von 2 mm eine Multiplikation mit 2.

Bei dieser Auswertung erhöhen Signale, die den Potential-Grenzwert von 0,1 V überschreiten, jederzeit den errechneten Füllstand um 2 mm. Es wird nicht geprüft, ob das Niveau im Schauglas tatsächlich vollständig bis zum jeweiligen Kontakt gestiegen ist. Somit kann im Schauglas zurückbleibendes Wasser, welches unter Umständen bei der Rotation Schaltkreise von Messleitungen unerwünscht schließt, zu falschen Messergebnissen und somit zu einem falsch berechneten Füllstand führen.

Zur Vermeidung dieser Fehleranfälligkeit wurde eine zweite Variante der Messsignalauswertung umgesetzt, bei der entsprechende Prüffunktionen vorgesehen sind.

### 3.6.1.2 Auswertung der Schauglassignale mit Prüffunktionen

Bei dieser Auswertung ist eine Absicherung eingebunden, wodurch ein Messkontakt die Berechnung des Füllstandes erst dann beeinflusst, wenn auch alle darunterliegenden Messsignale das Spannungspotential von 0,1 V überschritten haben.

Die Berechnung mit Prüffunktion sieht dann folgendermaßen aus:

$$Füllst = 2 \cdot (Signal_0 > 0,1) \cdot \sum_{i=1}^{17} \prod_{j=1}^i (Signal_j > 0,1)$$

### 3.6.2 Auswertung des Sensorsignals

#### 3.6.2.1 Einstellung des Ultraschallsensors

Der für das Referenzmesssystem verwendete Ultraschallsensor ist für einen Messbereich von 20 mm bis 320 mm geeignet.

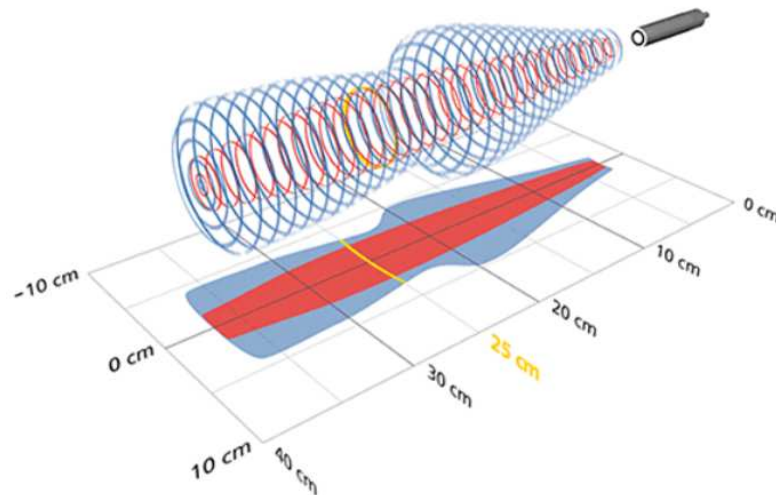


Abbildung 3-25: Ultraschallsensor Erfassungsbereich [5]

Der Messbereich des Sensors kann allerdings eingegrenzt werden und ist somit individuell anpassbar. Dadurch wird der Bereich des Ausgangssignals, in diesem Fall 0 V bis 10 V, für den eingestellten Messbereich verwendet und somit eine höhere Messgenauigkeit erzielt. Des Weiteren wird die Einstellmöglichkeit geboten, eine steigende oder fallende Kennlinie zu wählen. In diesem Anwendungsfall wurde der Sensor so eingestellt, dass bei Zunahme des Messabstandes das Ausgangssignal abnimmt und dieses somit direkt proportional zum Wasserfüllstand im Versuchszylinder ist.

Um ausreichend Abstand zu der Wasseroberfläche zu gewährleisten, wurde der Ultraschallsensor in einer Entfernung von 100 mm zur Zylindermantel-Innenseite befestigt. Da der Messbereich des Sensors von der Zylindermantel-Innenseite bis zu einem Füllstand von 30 mm reichen soll, wurde dieser von 70 mm bis 100 mm eingestellt. Dadurch wird vom Sensor eine Auflösung von 0,025 mm erreicht. Die Genauigkeit wird mit  $\pm 1\%$  angegeben und beträgt somit  $\pm 0,3$  mm.

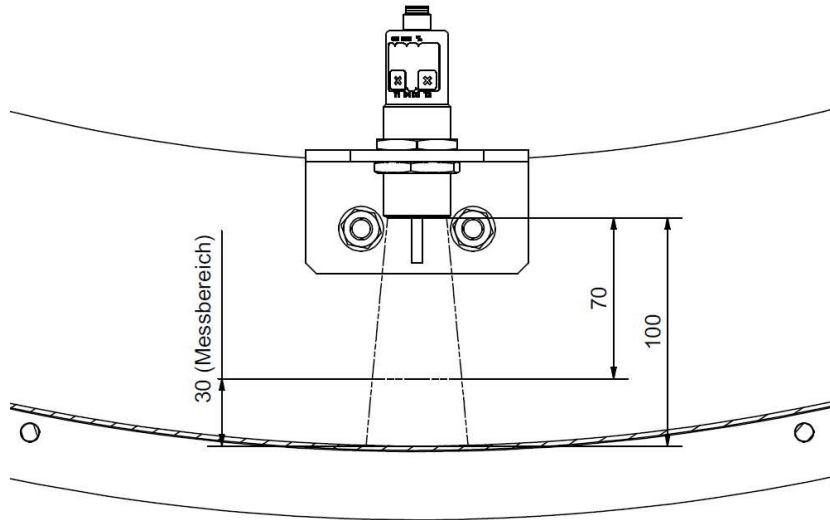


Abbildung 3-26: Einstellung Ultraschallsensor

### 3.6.2.2 Auswertung des Sensorsignals

Zur Berechnung des Füllstandes unter Verwendung des analogen Sensorsignals kann folgende Auswertungsformel herangezogen werden.

$$ME = \frac{(MB_{OG} - MB_{UG})}{(MW_{OG} - MW_{UG})} \cdot (MW - MW_{UG}) + MB_{UG}$$

$ME$	Messergebnis
$MW_{UG}$	Messwert untere Grenze
$MW_{OG}$	Messwert obere Grenze
$MB_{UG}$	Messbereich untere Grenze
$MB_{OG}$	Messbereich obere Grenze
$MW$	Messwert

Dies ergibt bei diesem Anwendungsfall folgende Formel:

$$Füllst = \frac{(30 - 0)}{(10 - 0)} \cdot (MW - 0) + 0$$

Beim Einbinden der Sensorauswertung zeigte sich jedoch, dass auch bei einem Wasserstand von 0 mm das Sensorsignal ein geringes Potential liefert, und bei einem Füllstand

von 30 mm das Potential von 10 V nicht erreicht wird. Folglich wurden diese Abweichungen bei der Umsetzung der Berechnungsformel berücksichtigt.

Analoges Ausgangssignal bei Füllstand 0 mm:  $0,08 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$

Analoges Ausgangssignal bei Füllstand 30 mm:  $9 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$

Vorerst umgesetzte Füllstandberechnung:

$$Füllst = \frac{30}{(9 - 0,08)} \cdot (MW - 0,08)$$

Aufgrund des gering schwankenden Sensorsignales trotz konstantem Messabstand, wurde die Formel zusätzlich mit einer Prüffunktion versehen, um das Ergebnis und die Darstellung eines negativen Füllstandes zu unterbinden.

Endgültige Füllstandberechnung:

$$Füllst = \frac{30}{(9 - 0,08)} \cdot (MW - 0,08) \cdot ((MW - 0,08) > 0)$$

Nur bei Zutreffen der zusätzlichen Prüffunktion gibt diese den Wert 1 zurück, andernfalls 0. Somit ist sichergestellt, dass bei einem Messwert von 0,08 V oder geringer, der errechnete Füllstand 0 mm ergibt.



## 4 Versuche am Versuchszylinder

Das nachfolgende Kapitel zeigt diverse Berechnungen, die zum Durchführen und Auswerten der einzelnen Versuche erforderlich sind. In weiterer Folge werden die grundsätzlichen Arten des Verhaltens eines Kondensats in einem glatten Trockenzylinder erläutert. Im Anschluss werden die Versuchspläne vorgestellt und die Auswertung der Messergebnisse des Versuchszylinders erfolgt. Es wird eine Aussage getroffen, für welche Auswertungen das Schauglasmessprinzip herangezogen werden kann.

### 4.1 Erforderliche Berechnungen

#### 4.1.1 Ermittlung der Zylindergeschwindigkeit

Der Versuchszylinder wird von einem Drehstrommotor angetrieben, welcher wiederum von einem Frequenzumrichter versorgt wird. Dieser Frequenzumrichter ermöglicht die Einstellung von 3,5 Hz bis 50 Hz. Demzufolge können in diesem Bereich jeweils gewünschte Drehzahlen des Elektromotors betrieben werden.

##### 4.1.1.1 Berechnung der Zylindergeschwindigkeit

Berechnung der Motordrehzahl bei 3,5 Hz:

$$n_{nenn} = 2890 \text{ min}^{-1} \quad \text{Nenndrehzahl Elektromotor}$$

$$n_{Mot.3,5Hz} = \frac{n_{nenn}}{50Hz} \cdot 3,5Hz$$

$$n_{Mot.3,5Hz} = \frac{2890 \text{ min}^{-1}}{50Hz} \cdot 3,5Hz \quad n_{Mot.3,5Hz} = 202,3 \text{ min}^{-1}$$

Berechnung der Zylinderdrehzahl bei 3,5 Hz:

$$d_{KRS.Mot} = 180 \text{ mm} \quad \text{Durchmesser Keilriemenscheibe am Motor}$$

$$d_{KRS.Zyl} = 910 \text{ mm} \quad \text{Durchmesser Keilriemenscheibe am Zylinder}$$

$$n_{Zyl.3,5Hz} = \frac{d_{KRS.Mot}}{d_{KRS.Zyl}} \cdot n_{Mot.3,5Hz} \quad n_{Zyl.3,5Hz} = \frac{180 \text{ mm}}{910 \text{ mm}} \cdot 202,3 \text{ min}^{-1} \quad n_{Zyl.3,5Hz} = 40 \text{ min}^{-1}$$

Berechnung der Zylindergeschwindigkeit bei 3,5 Hz:

$$d_{Zyl} = 1754 \text{ mm} \quad \text{Durchmesser Zylindermantel}$$



$$v_{Zyl,3,5Hz} = d_{Zyl} \cdot \pi \cdot n_{Zyl,3,5Hz} \quad v_{Zyl,3,5Hz} = 1,754m \cdot \pi \cdot 40min^{-1} \quad v_{Zyl,3,5Hz} = 220 \frac{m}{min}$$

Auf diese Weise wurde folgende Geschwindigkeitstabelle erstellt:

Frequenz [Hz]	Motordrehzahl [1/min]	Zylinderdrehzahl [1/min]	Zylindergeschwindigkeit [m/min]
3,5	202,3	40,0	220
4	231,2	45,7	252
5	289,0	57,2	315
6	346,8	68,6	378
7	404,6	80,0	441
8	462,4	91,5	504
9	520,2	102,9	567
10	578,0	114,3	630
11	635,8	125,8	693
12	693,6	137,2	756
13	751,4	148,6	819
14	809,2	160,1	882
15	867,0	171,5	945
16	924,8	182,9	1008
17	982,6	194,4	1071
18	1040,4	205,8	1134
19	1098,2	217,2	1197
20	1156,0	228,7	1260

**Tabelle 4-1: Errechnete Zylindergeschwindigkeiten**

#### 4.1.1.2 Ermittlung der Zylindergeschwindigkeit

Zur Kontrolle der errechneten Zylindergeschwindigkeit wurde diese bei unterschiedlichen Drehzahlen mit einem Messgerät überprüft. Diese Messungen zeigten, dass es zu einer Abweichung von den theoretischen Geschwindigkeiten gibt, zum anderen variiert die Geschwindigkeit, vor allem bei niedriger Frequenz. Das Messgerät wurde dabei an einem Durchmesser von 816 mm angewendet. Somit wurden in weiterer Folge die Messergebnisse auf den tatsächlichen Zylindermanteldurchmesser hochgerechnet, ein Durchschnittswert von Minimal- und Maximalwert gebildet, und dieser mit der errechneten Geschwindigkeit verglichen.

Folgende Tabelle zeigt den Vergleich der gemessenen und errechneten Geschwindigkeiten:

Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit						Abweichung
	[m/min]						[m/min]
	d=816mm		d=1754mm				v_durch-v_theo
	v_min	v_max	v_min	v_max	v_durch	v_theo	
3,5	105,0	125,0	226	269	247	220	27
5	145,0	170,0	312	365	339	315	24
10	310,0	316,0	666	679	673	630	43
15	465,0	472,0	1000	1015	1007	945	62

Tabelle 4-2: Gemessene Zylindergeschwindigkeiten

Bei den durchgeführten Versuchen wurde der Durchschnittswert der gemessenen Geschwindigkeiten zur Auswertung herangezogen. Bei Frequenzen zwischen den Messpunkten wurde zur Geschwindigkeitsermittlung linear interpoliert.

#### 4.1.2 Berechnung der Wassermenge (Kreissegment)

Um den Schaltzeitpunkt der einzelnen Messleitungen entsprechend dem Füllstand-Niveau im Schauglas prüfen zu können, und somit die Position der Messpunkte zu kontrollieren, war eine Berechnung der zum Erreichen der Messpunkte erforderlichen Wassermengen notwendig. Die bei stillstehendem Versuchszylinder, im unteren Kreissegment angesammelte Wassermenge, wurde wie folgt berechnet.

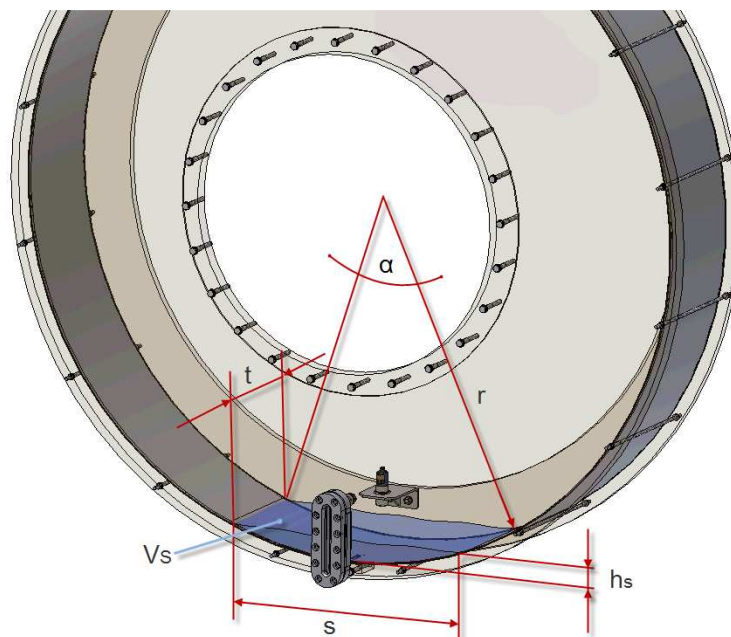


Abbildung 4-1: Maße Kreissegment

Berechnung der Kreissehne:

$$r = 877\text{mm} \quad \text{Radius der Zylindermantelinnenseite}$$

$$h_s = 10\text{mm} \quad \text{Füllstand bei Segmentbildung}$$

$$s = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot h_s - h_s^2} \quad s = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot 877\text{mm} \cdot 10\text{mm} - (10\text{mm})^2} \quad s = 264,12\text{mm}$$

Berechnung des Kreissegmentwinkels:

$$\alpha = 4 \cdot \arctan\left(\frac{2h_s}{s}\right) \quad \alpha = 4 \cdot \arctan\left(\frac{20\text{mm}}{264,12\text{mm}}\right) \quad \alpha = 0,3023\text{rad}$$

Berechnung der Kreissegmentfläche:

$$A_s = \frac{r^2}{2} \cdot (\alpha - \sin(\alpha)) \quad A_s = \frac{(877\text{mm})^2}{2} \cdot (0,3023\text{rad} - \sin(0,3023\text{rad})) \quad A_s = 1762,83\text{mm}^2$$

Berechnung des Volumens:

Die theoretische Tiefe des Zylinders von 285 mm entsprach nicht der Realität. Folglich wurde diese bei der Volumenberechnung den tatsächlichen Gegebenheiten angepasst.

$$t = 284\text{mm} \quad \text{Tiefe des Zylinders}$$

$$V_s = A_s \cdot t \quad V_s = \frac{1762,83\text{mm}^2 \cdot 284\text{mm}}{1000} \quad V_s = 500,64\text{mL}$$

Nach diesem Berechnungsvorgang wurde nachfolgende Volumentabelle erstellt:

Füllstand [mm]	Kreissehne [mm]	Kreissegmentwinkel [rad]	Kreissegmentfläche [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mL]
10	264,12	0,3023143	1762,83	501
12	289,16	0,3312320	2316,50	658
14	312,15	0,3578398	2918,12	829
16	333,51	0,3826200	3564,03	1012
18	353,54	0,4059075	4251,29	1212
20	372,45	0,4279460	4977,45	1419
22	390,4	0,4489197	5740,46	1636
24	407,53	0,4689713	6538,52	1863
26	423,92	0,4882145	7370,09	2100
28	439,67	0,5067415	8233,79	2347
30	454,84	0,5246283	9128,39	2602
32	469,48	0,5419381	10052,80	2865
34	483,65	0,5587246	11006,02	3137

**Tabelle 4-3: Volumentabelle für Kreissegmentbildung**

### 4.1.3 Berechnung der Wassermenge (Ringbildung)

Zur Auswertung der Versuche bei einem Betrieb mit Wasserring, war eine Berechnung der zum Erreichen des jeweiligen Füllstandes erforderlichen Wassermenge notwendig.

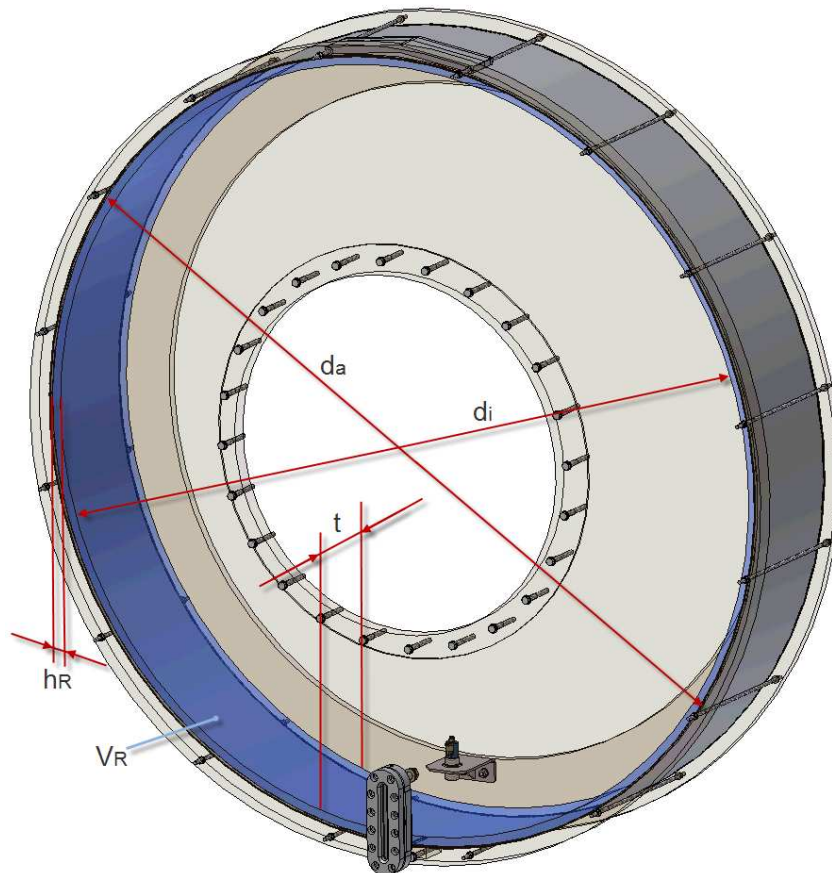


Abbildung 4-2: Maße Wasserring

Berechnung des Volumens:

Die theoretische Tiefe des Zylinders von 285 mm entsprach nicht der Realität. Folglich wurde diese bei der Volumenberechnung den tatsächlichen Gegebenheiten angepasst.

$d_a = 1754\text{mm}$  Außendurchmesser des Wasserringes

$h_R = 2\text{mm}$  Füllstand bei Ringbildung

$t = 284\text{mm}$  Tiefe des Zylinders

$$d_i = d_a - 2 \cdot h_R$$

$$d_i = 1754\text{mm} - 4\text{mm}$$

$$d_i = 1750\text{mm}$$

$$A_R = (d_a^2 - d_i^2) \cdot \frac{\pi}{4} \quad A_R = ((1754\text{mm})^2 - (1750\text{mm})^2) \cdot \frac{\pi}{4} \quad A_R = 11008,14\text{mm}^2$$

$$V_R = A_R \cdot t \quad V_R = \frac{11008,14\text{mm}^2 \cdot 284\text{mm}}{1000} \text{ mL} \quad V_R = 3126,31\text{mL}$$

Analog zu dieser Berechnung wurde folgende Volumentabelle erstellt:

Füllstand [mm]	Aussendurchmesser [mm]	Innendurchmesser [mm]	Tiefe [mm]	Volumen [mL]
2	1754	1750,0	284	3126
2,4	1754	1749,2	284	3751
2,8	1754	1748,4	284	4375
3,2	1754	1747,6	284	4999
3,6	1754	1746,8	284	5622
4	1754	1746,0	284	6245
4,4	1754	1745,2	284	6868
4,8	1754	1744,4	284	7491
5,2	1754	1743,6	284	8114
5,6	1754	1742,8	284	8736
6	1754	1742,0	284	9358
6,4	1754	1741,2	284	9979
6,8	1754	1740,4	284	10600
7,2	1754	1739,6	284	11221
7,6	1754	1738,8	284	11842
8	1754	1738,0	284	12462
10	1754	1734,0	284	15560

**Tabelle 4-4: Volumentabelle für Wasserringbildung**

## 4.2 Grundsätzliche Arten des Kondensat-Verhaltens

Abhängig von der Zylindergeschwindigkeit kann das Kondensat in einem glatten Zylinder einen Sumpf, einen umlaufenden Ring, oder eine Mischung dieser beiden Zustände bilden.

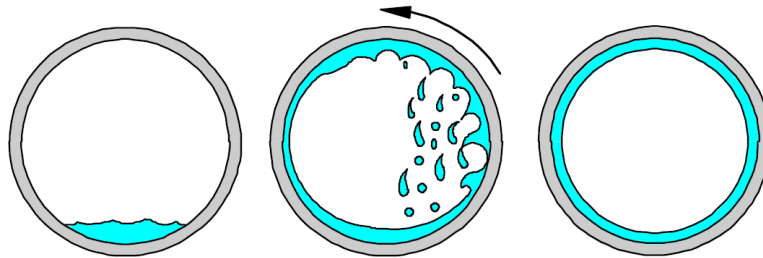


Abbildung 4-3: Kondensatzustände in rotierenden Zylindern [11]

„Dreht sich der Zylinder langsam, sammelt sich das gesamte Kondensat in einem Sumpf im unteren Bereich des Zylinders. Es ergibt sich somit ein Sumpfbetrieb. Dreht sich der Zylinder mit entsprechend höherer Geschwindigkeit, beginnt eine dünne Kondensatschicht der inneren Manteloberfläche zu folgen. Der Großteil dieser Kondensatmenge fällt allerdings wieder zurück in den unteren Bereich des Zylinders, anstatt der Zylinderoberfläche der gesamten Umdrehung zu folgen. Dieses Mischverhalten tritt, abhängig vom Zylinderdurchmesser, bei Geschwindigkeiten von 335 – 365 m/min auf. Moderne Papiermaschinen werden allerdings mit weit höheren Geschwindigkeiten betrieben, wobei sich das Kondensat zu einer dünnen Schicht an der gesamten inneren Manteloberfläche ausbreitet. Somit kommt es zur Ausbildung eines Ringes, welcher keine großen Turbulenzen aufweist.“ [11] „Die Dicke dieses Wasserringes ist allerdings über den Umfang betrachtet nicht konstant. Außerdem variiert sie abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit und vom Durchmesser des Zylinders.“ [10]

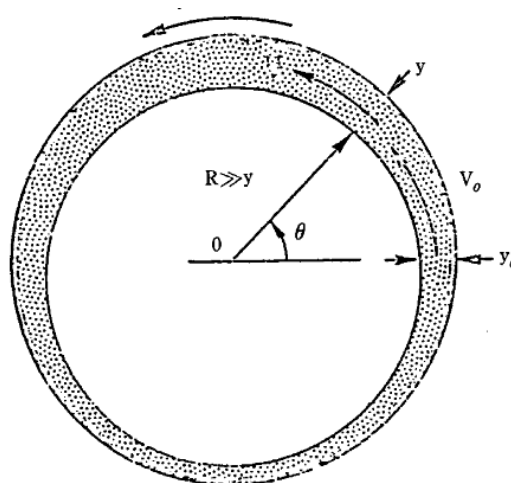
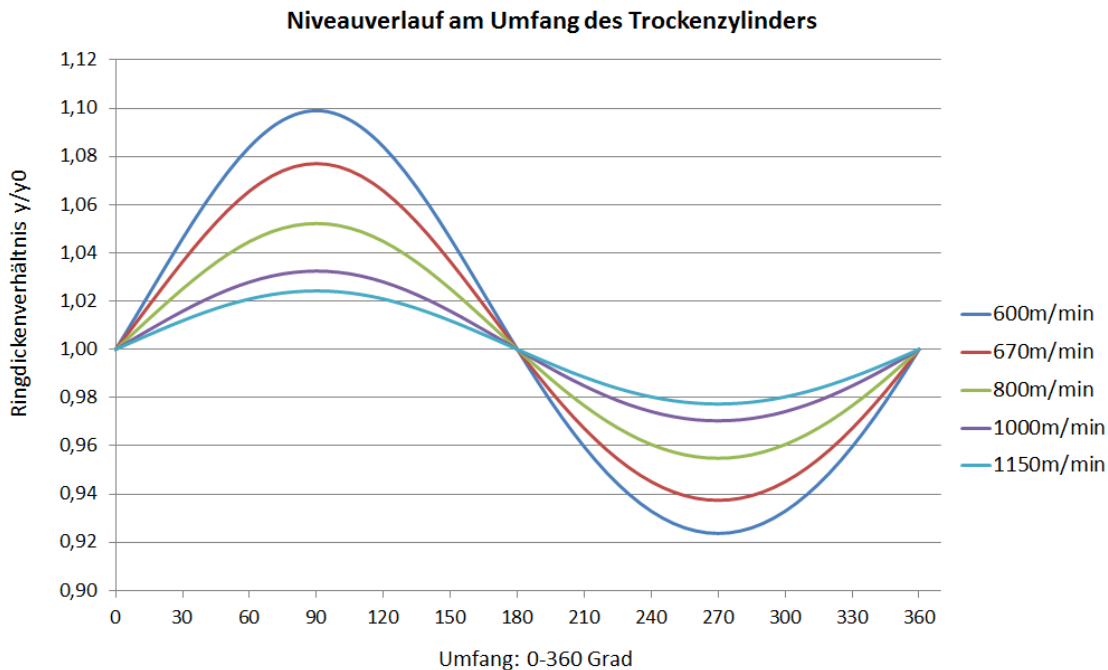


Abbildung 4-4: Kondensatdicke am Umfang eines Trockenzylinders [10]

„Das Verhältnis der aktuellen Kondensatfilmdicke  $y$  entlang des Umfanges zur mittleren Filmdicke  $y_0$  kann folgendermaßen beschrieben werden:“ [10]

$$\frac{y}{y_0} = \left(1 - \frac{2 \cdot g \cdot R}{V_0^2} \cdot \sin\theta\right)^{-0,5}$$

Daraus ergibt sich am Umfang des Versuchszylinders ( $R=877$  mm) folgendes theoretisches Kondensatfilmdickenverhältnis für die Geschwindigkeiten 600 m/min, 670 m/min, 800 m/min, 1000 m/min und 1150 m/min:



**Abbildung 4-5: Kondensatfilmdickenverhältnis am Umfang des Versuchszylinders**

Dieses bekannte Verhalten wird in späterer Folge zur Überprüfung der Ultraschallsensormessung herangezogen.

### 4.3 Versuche und Auswertungen am Versuchszylinder

Der Vergleich der Messergebnisse der Schauglasmessung mit jener des Ultraschallsensors soll zur Beurteilung des Schauglasmessprinzips herangezogen werden. Dabei werden bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Wassermengen die ermittelten Niveau-Verläufe der beiden Messsysteme gegenübergestellt.

### 4.3.1 Versuche bei Wassersumpf – Betrieb

#### 4.3.1.1 Versuchsplan

Sumpfbetrieb	Versuchsdatum: 15.06.2012									
	Füllstand:									
Geschwindigkeit	Segment		Ring	Segment		Ring	Segment		Ring	
m/min	20mm	△	0,91mm	34mm	△	2,01mm	53,9mm	△	4mm	
80	08:49:44			-			-			
150	08:49:06			-			-			
250	08:56:56			09:11:58			09:35:10			
340	08:58:38			09:13:27			09:38:11			

Tabelle 4-5: Versuchsplan bei Sumpfbetrieb

#### 4.3.1.2 Messauswertung bei Segmentfüllstand 20 mm, 80 m/min

**Vergleichsmessung:** Schauglasmesswerte ohne Prüffunktion / Ultraschallsensor, zusätzlich ist die Dauer einer Zylinderumdrehung dargestellt.

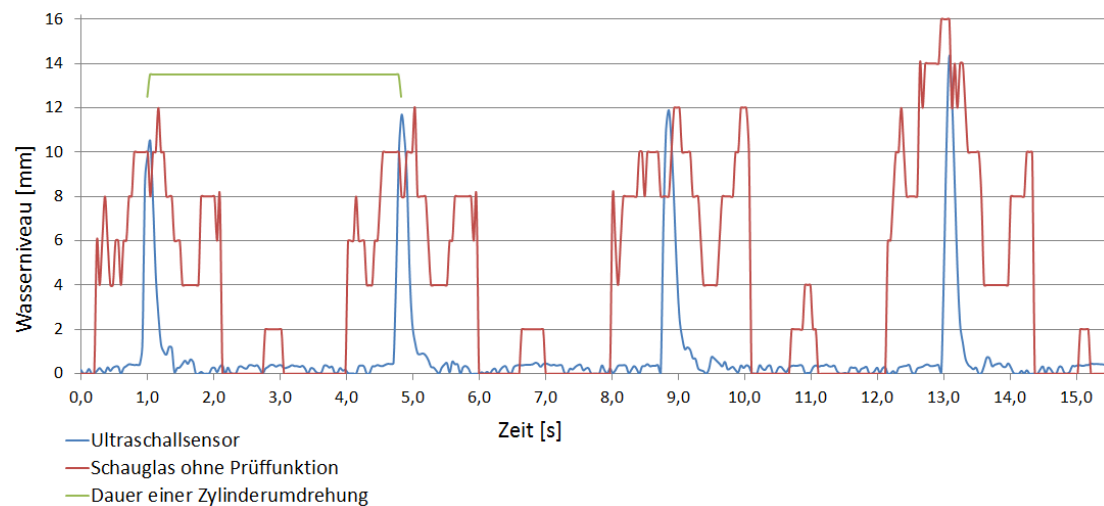
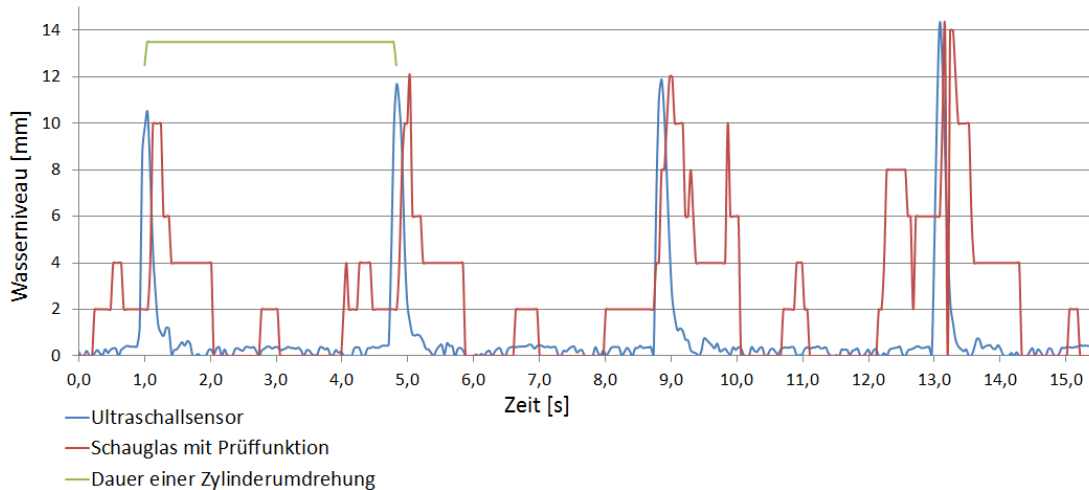


Abbildung 4-6: Vergleichsmessung bei 80 m/min ohne Prüffunktion



**Vergleichsmessung:** Schauglasmesswerte mit Prüffunktion / Ultraschallsensor, zusätzlich ist die Dauer einer Zylinderumdrehung dargestellt.



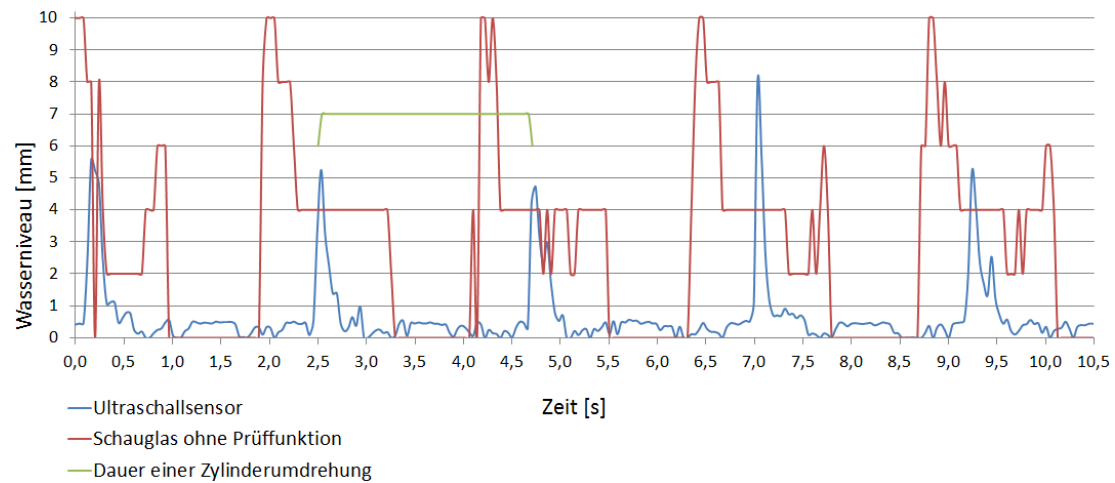
**Abbildung 4-7: Vergleichsmessung bei 80 m/min mit Prüffunktion**

Beim Vergleich der beiden Auswertungen zeigen die Schauglasmesswerte mit Prüffunktion eine weitaus bessere Übereinstimmung mit den Ultraschallsensormesswerten. Die Maxima treten allerdings geringfügig zeitverzögert auf. Die Schauglasmesswerte ohne Prüffunktion zeigen eine breite Streuung um den Maximalwert. Dies lässt darauf schließen, dass einige Messleitungen vor bzw. nach dem Eintauchen des Schauglases in den Sumpfbereich von dem im Schauglas zurückbleibenden Wasser kontaktiert werden und somit eine Messwertverfälschung hervorrufen.

Die theoretische mittlere Ringdicke beträgt 0,91 mm. Der Durchschnittswert des Ultraschallsensors liegt bei 0,79 mm. Der Durchschnitt der Schauglasmesswerte ohne Prüffunktion liegt bei 4,29 mm, bei den Schauglasmesswerten mit Prüffunktion bei 2,53 mm. Folglich weist dieser Versuch darauf hin, dass der Schauglasmesswert mit Prüffunktion unter diesen Bedingungen zuverlässigere Ergebnisse liefert.

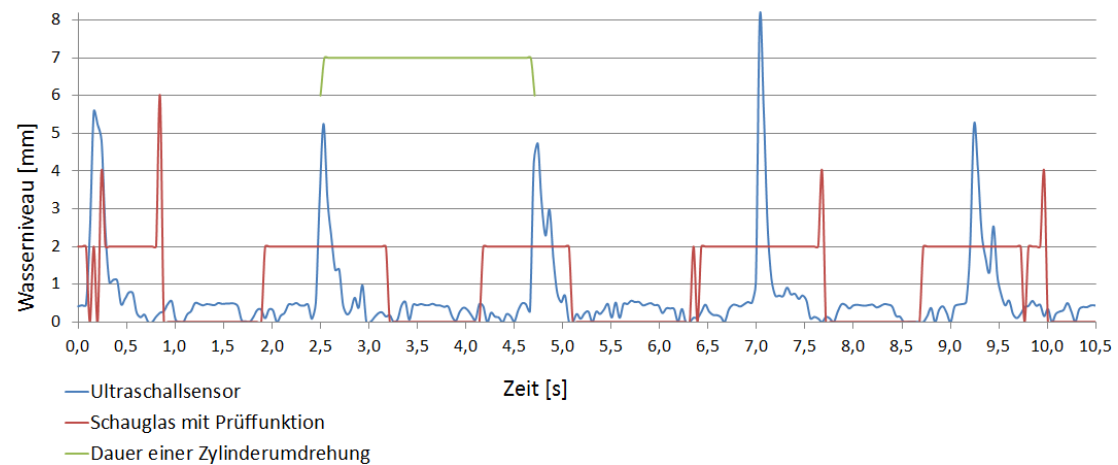
#### 4.3.1.3 Messauswertung bei Segmentfüllstand 20 mm, 150 m/min

**Vergleichsmessung:** Schauglasmesswerte ohne Prüffunktion / Ultraschallsensor, zusätzlich ist die Dauer einer Zylinderumdrehung dargestellt.



**Abbildung 4-8: Vergleichsmessung bei 150 m/min ohne Prüffunktion**

**Vergleichsmessung:** Schauglasmesswerte mit Prüffunktion / Ultraschallsensor, zusätzlich ist die Dauer einer Zylinderumdrehung dargestellt.



**Abbildung 4-9: Vergleichsmessung bei 150 m/min mit Prüffunktion**

Im ersten Diagramm zeigen die Schauglasmesswerte ohne Prüffunktion einen deutlich größeren und zeitlich verschobenen Ausschlag im Bezug zum Ultraschallsensor im Gegensatz zu den Schauglasmesswerten mit Prüffunktion im zweiten Diagramm. Dieses Verhalten kann erneut durch Wasser, welches während der Umdrehung im Schauglas zurückbleibt und vor dem Eintauchen in den Sumpf einige Messleitungen kontaktiert, hervorgerufen werden. Aufgrund der Prüffunktion bei der Schauglasmesswertermittlung tritt dieser Fehler im zweiten Diagramm nicht auf.

Der durchschnittliche Sensormesswert beträgt 0,65 mm und weicht somit um 0,26 mm von der theoretischen mittleren Ringdicke (0,91 mm) ab. Der mittlere Schauglasmesswert ohne Prüffunktion ergibt 2,87 mm. Der Mittelwert des Schauglases mit Prüffunktion liegt bei 1,07 mm. Somit zeigt auch dieser Versuch, dass die Prüffunktion bei der Schauglasmessung erforderlich ist. Aber bei dieser Geschwindigkeit stimmen die Maximalwerte auch mit Prüffunktion nicht mehr überein. Der Schauglasmesswert erreicht im Sumpfbereich den Maximalwert des Ultraschallsensors nicht, der Maximalwert von 4 mm des Schauglases – wenn vorhanden – tritt zeitverzögert auf. Beides weist darauf hin, dass bei großen Niveau-Änderungen in kurzer Zeit, wie es bei Sumpfbetrieb der Fall ist, das Wasser beim Schauglas nicht schnell genug zu- bzw. abfließt.

Um dies zu belegen, wurden bei einigen Versuchen Fotoaufnahmen des Schauglases im Bereich des Sumpfes mittels einer Highspeed – Kamera durchgeführt, und somit den Vergleich von tatsächlichem Wasser-Niveau im Zylinder und Niveau im Schauglas darzustellen.

Nachfolgende Fotoaufnahmen wurden bei einem Versuch mit einer Geschwindigkeit von 150 m/min aufgenommen:

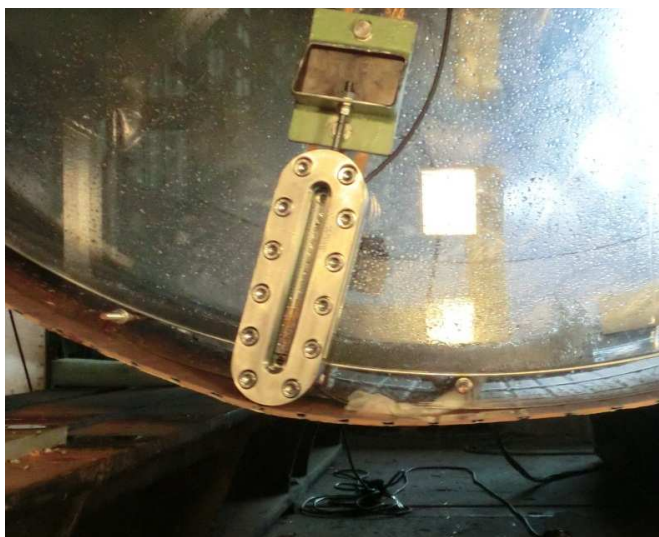
Bei diesen Aufnahmen dreht sich der Versuchszylinder an der fotografierten Stelle nach links. Daher sammelt sich das Wasser nicht zentral an der untersten Stelle, sondern folgt entsprechend der Laufrichtung dem Mantel des Zylinders.



Beim ersten Foto befindet sich das Schauglas kurz nach dem Eintritt in den Wassersumpf. Bereits zu diesem Zeitpunkt müsste das Niveau im Schauglas etwas angestiegen sein, stattdessen zeigt es einen Füllstand im Bereich von 0 mm.



Bei der nächsten Aufnahme befindet sich das Schauglas zentral im Wassersumpf. Um das tatsächliche Wasser-Niveau des Zylinders abzubilden, müsste der Füllstand im Schauglas bereits deutlich angestiegen sein. Es ist jedoch zu erkennen, dass dieser nur geringfügig angestiegen ist, und somit eine erhebliche Differenz zum tatsächlichen Wasser-Niveau im Zylinder aufweist.



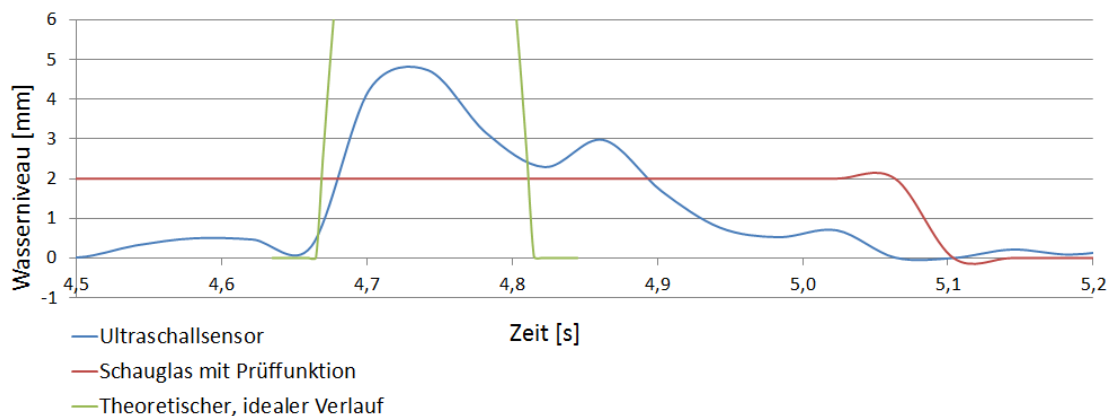
Die nächste Aufnahme dieser Fotoserie zeigt das Schauglas noch im Bereich des Wassersumpfes, allerdings nimmt die Niveau-Höhe im Zylinder an dieser Stelle bereits wieder ab. Der Füllstand im Schauglas ist erneut geringfügig angestiegen, weist aber selbst an dieser Position noch einen wesentlichen Niveau-Unterschied zum tatsächlichen Wasserstand auf.

**Abbildung 4-10: Schauglas beim Sumpfdurchlauf**

Somit bestätigen die Aufnahmen das bereits von den Diagrammen abgeleitete Verhalten. Bei Sumpfbetrieb, also bei schnellen, größeren Füllstandänderungen erfolgt der Zu- bzw. Abfluss des Wassers im Schauglas nicht schnell genug und die Anpassung des Niveaus ist deutlich verzögert. Dies hat zur Folge, dass der maximale Füllstand des Zylinders im Schauglas nicht erreicht wird. Somit ist das Schauglasmessprinzip für eine präzise Niveau-Auswertung in diesem Geschwindigkeitsbereich nicht geeignet.

#### 4.3.1.4 Beurteilung des Sensorsignals

Am ersten Blick scheint auch die Sensorauswertung, aufgrund des relativ scharf dargestellten Peaks beim Durchlaufen des Sumpfes (Abb. 4-9), nicht mit dem auf den Bildern ersichtlichen Wasserverhalten übereinzustimmen. Wird das Signal allerdings an den entsprechenden Stellen etwas genauer betrachtet, sind der steile Anstieg und der flache Rückgang des Wasser-Niveaus doch deutlich ersichtlich (Abb. 4-11). Zusätzlich ist ein theoretischer, idealer Niveau-Verlauf beim Durchlaufen des Sumpfes dargestellt.



**Abbildung 4-11: Signalverlauf beim Sumpfdurchlauf bei 150 m/min**

Des Weiteren wurde zur Beurteilung der Sensormessung der theoretische, ideale Niveau-Verlauf den Auswertungen des Sensors beim Durchlaufen des Sumpfes bei einer Geschwindigkeit von 80 m/min gegenübergestellt. Es ist zu beachten, dass, trotz der geringen Versuchsgeschwindigkeit, Wasser in Laufrichtung des Zylindermantels mittransportiert wird.

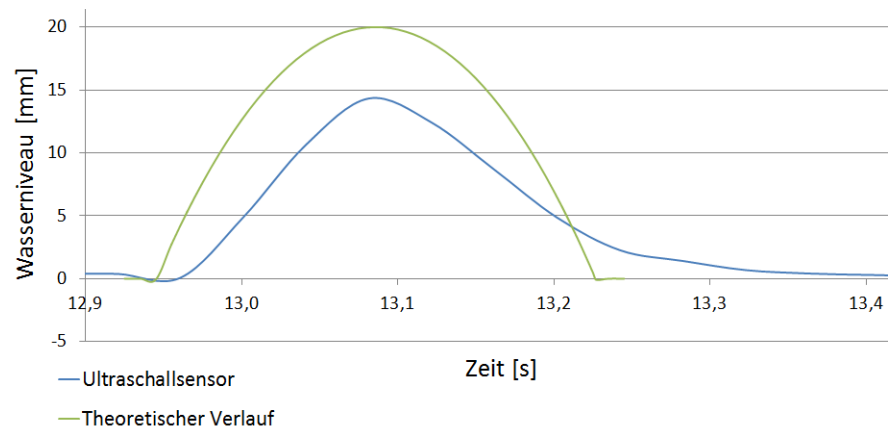


Abbildung 4-12: Signalverlauf beim Sumpfdurchlauf bei 80 m/min

Der Ausschlag des Sensorsignals bildet den theoretischen Niveau-Verlauf annähernd ab. Es ist zu erkennen, dass der gemessene Sumpf kleiner als der Theoretische ist. Ein Teil des Wassers befindet sich direkt am Sumpfauslauf.

4.3.1.5 Auswertungsübersicht Wassersumpf-Betrieb

Folgende Tabelle zeigt die bei Wassersumpf-Betrieb ermittelten Durchschnittswerte von Ultraschallsensor, Schauglas mit Prüffunktion, Schauglas ohne Prüffunktion sowie deren Abweichungen von der jeweiligen theoretischen mittleren Ringdicke.

Geschwindigkeit	US	US-Abw		SG mit PF		SG mit PF-Abw		SG ohne PF		SG ohne PF-Abw	
m/min	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]		[mm]	[mm]	[%]	
	Theoretische mittlere Ringdicke: 0,91mm										
80	0,79	-0,12	-13%	2,53	1,62	178%		4,29	3,38	371%	
150	0,65	-0,26	-29%	1,07	0,16	18%		2,87	1,96	215%	
250	0,21	-0,70	-77%	2,34	1,43	157%		2,34	1,43	157%	
340	0,26	-0,65	-71%	2,16	1,25	137%		2,16	1,25	137%	
	Theoretische mittlere Ringdicke: 2,01mm										
250	0,15	-1,86	-93%	2,46	0,45	22%		2,47	0,46	23%	
340	0,94	-1,07	-53%	2,58	0,57	28%		2,58	0,57	28%	
	Theoretische mittlere Ringdicke: 4mm										
250	0,30	-3,70	-93%	2,63	-1,37	-34%		3,64	-0,36	-9%	
340	2,42	-1,58	-40%	1,90	-2,10	-53%		2,10	-1,90	-48%	

Tabelle 4-6: Auswertungsübersicht Wassersumpf-Betrieb

Dabei zeigt der Ultraschallsensor jeweils bei einer Geschwindigkeit von 250 m/min die größte Abweichung. Diese ist bei den letzten beiden Versuchsreihen auch deutlich größer im Vergleich zur Abweichung bei 340 m/min. Des Weiteren ergibt die Auswertung der Versuche mit geringer Ringdicke ab einer Geschwindigkeit von 250 m/min keine Differenz der beiden Schauglasergebnisse. Vermutlich bildet die geringe Wassermenge bereits ab dieser Geschwindigkeit einen dünnen Wasserfilm an der gesamten Zylindermantelinnen-seite. Die Abweichungen der Schauglasergebnisse zur Theorie sind bei den Versuchen mit größerer Ringdicke (2,01 mm bzw. 4 mm) deutlich geringer als bei dem Versuch mit einer Ringdicke von 0,91 mm.

### **4.3.2 Versuche bei Wasserring – Betrieb**

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Versuchen bei Wassersumpf – Betrieb, wurden für nachfolgende Auswertungen ausschließlich die Schauglasmesswerte mit Prüffunktion herangezogen. Diese sind in den folgenden Auswertungsdiagrammen den Sensormesswerten gegenübergestellt. Zusätzlich ist der theoretische Verlauf der Wasserringdicke in den Diagrammen dargestellt. Die Position des Verlaufes auf der Zeitachse wurde an den jeweiligen Sensorverlauf angepasst. Es wäre also möglich, dass in Realität eine Verschiebung zwischen Sensorauswertung und Theorie vorliegt. Die Schauglasmesswerte können den theoretisch erwarteten Niveau-Verlauf aufgrund der Messpunktabstände von 2 mm nicht beschreiben. Somit wurde untersucht, ob der Schauglas-Niveau-Verlauf, durch Mittelwertbildung von Schauglasmesswerten innerhalb kurzer Zeitabschnitte, mit dem theoretischen Verlauf gleich bzw. diesem ähnlich ist. Dabei ergab eine Mittelwertbildung über einen Zeitraum von 0,15 Sekunden die besten Übereinstimmungen. Folglich ist in den Diagrammen auch der Mittelwertverlauf der Schauglasmesswerte dargestellt.

#### **4.3.2.1 Versuchsplan**

Bei den Versuchsplänen ist das Versuchsdatum sowie die Durchführungszeit angeführt. Des Weiteren sind die Versuchsreihen (2 mm, 2,4 mm...) gekennzeichnet, ob das erforderliche Wasservolumen neu definiert (ND) oder mittels Differenzvolumen (DV) zur vorherigen Versuchsreihe definiert wurde.

Ringbetrieb	Versuchsdatum:				
	19.06.2012				
Geschwindigkeit	Theoretische Ringdicke:				
m/min	2,0mm	2,4mm	2,8mm	3,2mm	3,6mm
	ND	ND	ND	ND	ND
600	15:41:39	16:11:18	16:47:16	17:10:18	17:36:14
800	15:48:28	16:13:24	16:48:47	17:11:33	17:37:49
1000	15:50:50	16:15:34	16:50:06	17:13:08	17:39:09
1150	15:52:31	16:31:13	16:51:43	17:14:17	17:42:05

Tabelle 4-7: Versuchsplan bei Ringbetrieb 2 mm – 3,6 mm

Ringbetrieb	Versuchsdatum:				
	19.06.2012		20.06.2012		
Geschwindigkeit	Theoretische Ringdicke:				
m/min	4,0mm	4,4mm	4,8mm	5,2mm	5,6mm
	ND	ND	ND	ND	DV
600	18:11:46	18:39:15	16:13:39	18:32:55	18:40:06
800	18:13:34	18:41:38	16:15:14	18:33:57	18:41:16
1000	18:14:49	18:43:10	16:16:58	18:34:57	18:42:17
1150	18:15:42	18:44:57	17:39:12	18:36:23	-

Tabelle 4-8: Versuchsplan bei Ringbetrieb 4 mm – 5,6 mm

Ringbetrieb	Versuchsdatum:				
	20.06.2012			15.06.2012	
Geschwindigkeit	Theoretische Ringdicke:				
m/min	6,0mm	6,4mm	6,8mm	8mm	10mm
	DV	DV	DV	ND	ND
600	18:46:26	18:53:36	19:01:51	-	-
670	-	-	-	13:42:14	14:28:53
800	18:48:23	18:54:42	19:03:08	-	-
1000	18:49:25	18:57:18	19:04:27	14:04:13	14:34:51

Tabelle 4-9: Versuchsplan bei Ringbetrieb 6 mm – 10 mm



#### 4.3.2.2 Messauswertungen bei theoretischer Ringdicke 2,4 mm

##### Vergleichsmessung bei 600 m/min:

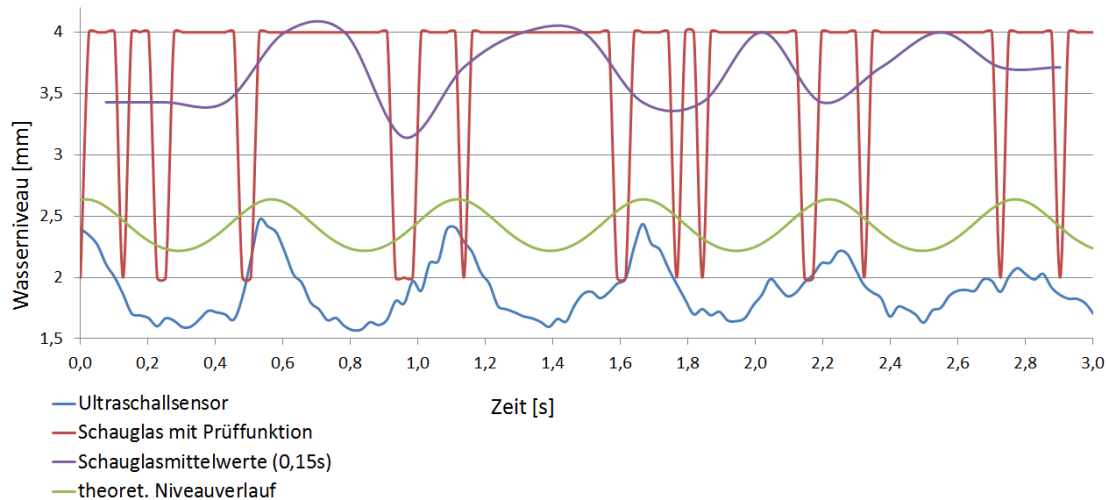
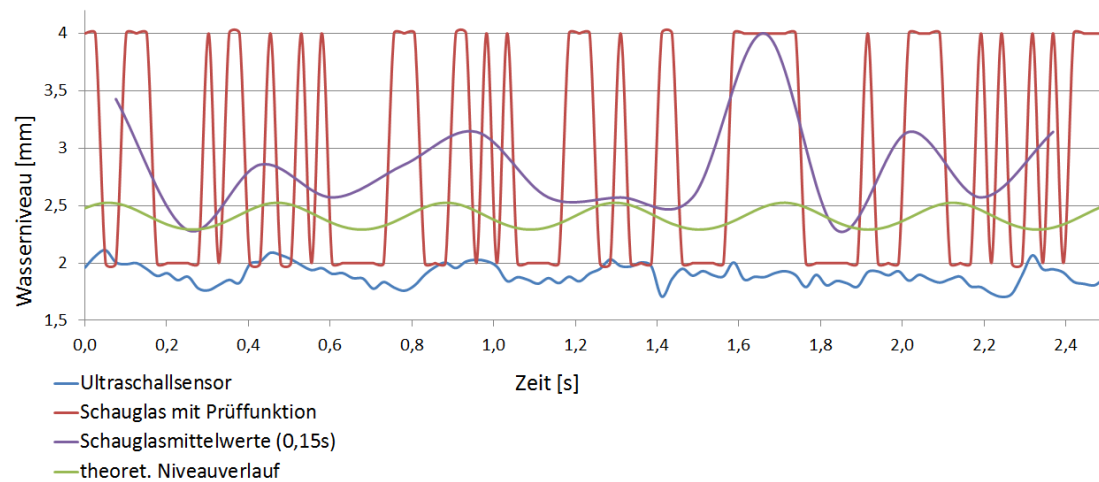


Abbildung 4-13: Vergleichsmessung bei 2,4 mm Ringdicke und 600 m/min

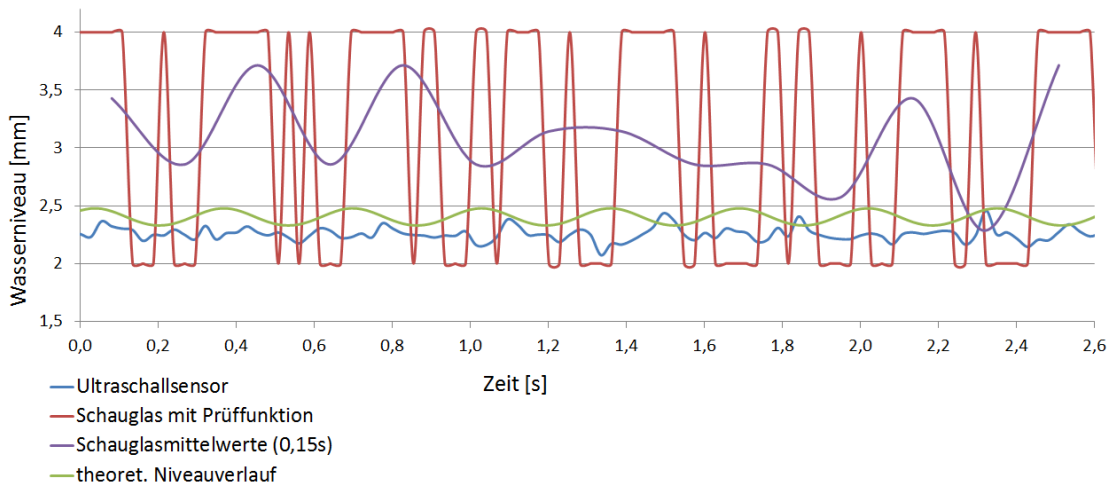
**Schauglasmesswerte:** Trotz einer theoretischen Füllmenge von 2,4 mm zeigt der Schauglasmesswert meist 4 mm und springt immer wieder kurzzeitig auf 2 mm. Ein ähnliches Verhalten tritt bei mehreren Versuchsreihen bei 600 m/min auf, und ist somit möglicherweise auf die geringere Fliehkraft des Wassers im Schauglas zurückzuführen. Die Messwerte mit 2 mm sind meist in jenem Bereich, bei dem sich der Sensormesswert im Bereich des Maximums befindet. Die Auswertung der Schauglasmittelwerte ergibt somit einen unregelmäßig schwankenden Verlauf, der ähnlich dem Sensorverlauf ist, jedoch eine Verschiebung von ca. einer halben Periodendauer aufweist. Dieser Versuch schließt somit nicht aus, dass eine Bestimmung des Ringdickenverlaufes mit der Schauglasauswertung möglich ist. Der Durchschnitt der Schauglasmesswerte liegt bei 3,69 mm und ist somit im Vergleich zur theoretischen Ringdicke (2,4 mm) um 1,29 mm zu hoch.

**Sensormesswerte:** Beim Sensorverlauf ist die periodenartige Schwingung, ähnlich zum theoretischen Niveau-Verlauf, deutlich zu erkennen. Die Frequenz stimmt dabei sehr genau überein. Das Signal zeigt sich allerdings im unteren Bereich eher flach, im oberen Bereich mit steileren Flanken als theoretisch erwartet. Der Mittelwert des Sensorsignales ist bei diesem Versuch 1,89 mm und somit um 0,51 mm zu gering. Die durchschnittliche Differenz zwischen Maximalwerten und Minimalwerten (Mittlerer Spitze-Tal-Wert) beträgt 0,57 mm und weicht um 0,15 mm von der Theorie (0,42 mm) ab.

**Vergleichsmessung bei 800 m/min:****Abbildung 4-14: Vergleichsmessung bei 2,4 mm Ringdicke und 800 m/min**

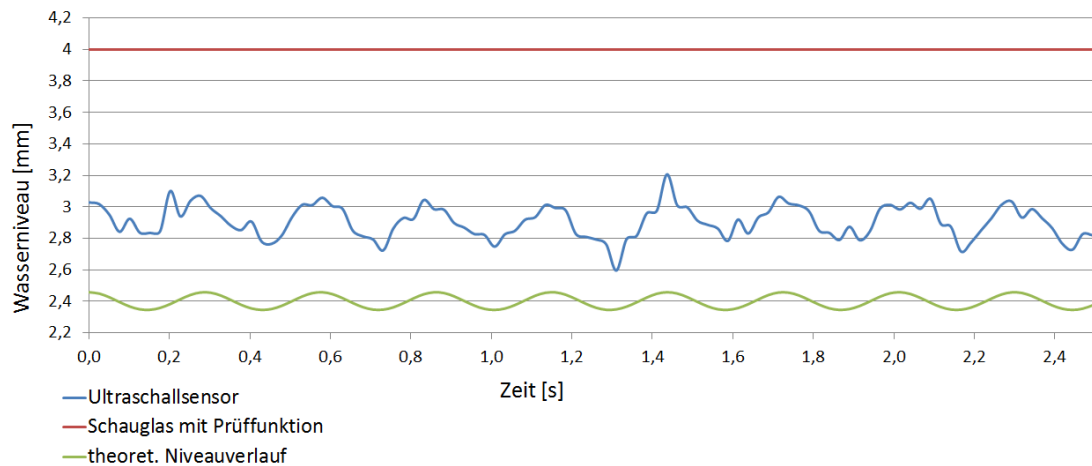
**Schauglasmesswerte:** Die Schauglasmesswerte springen ohne Regelmäßigkeit zwischen 2 mm und 4 mm. Breitere 2 mm Bereiche fallen allerdings immer wieder mit theoretischen Minima zusammen. Der Verlauf der 0,15 s-Mittelwerte zeigt im Vergleich zur Theorie teilweise ähnliche Tendenzen. Die Ausschläge sind allerdings sehr unregelmäßig und somit die Auswertung zur Ermittlung des Niveau-Verlaufes nicht heranzuziehen. Der Durchschnitt der Schauglasmesswerte ergibt 2,89 mm und ist im Vergleich zu der theoretischen Ringdicke um 0,49 mm zu hoch.

**Sensormesswerte:** Bei diesem Versuch ist das periodische Schwingen des Sensorsignals nur teilweise zu erkennen. Der Durchschnitt des Sensorsignals liegt hier bei 1,9 mm und ist somit um 0,50 mm geringer als erwartet. Der mittlere Spitze-Tal-Wert des Sensorsignals ergibt 0,16 mm. Er weicht um 0,07 mm von der Theorie (0,23 mm) ab.

**Vergleichsmessung bei 1000 m/min:****Abbildung 4-15: Vergleichsmessung bei 2,4 mm Ringdicke und 1000 m/min**

**Schauglasmesswerte:** Diese springen erneut ohne Regelmäßigkeit zwischen 2 mm und 4 mm. Der Verlauf der Schauglasmittelwerte ist bei diesem Versuch unregelmäßig und zeigt teilweise zu große Ausschläge. Das Schauglas kann somit für die Bestimmung des Niveau-Verlaufes nicht herangezogen werden. Der Vergleich des Schauglasmittelwertes (3,09 mm) mit der theoretischen Ringdicke ergibt eine Differenz von 0,69 mm.

**Sensormesswerte:** In diesem Fall ist ein periodisches Sensorsignal nicht zu erkennen. Der Sensormittelwert liegt bei 2,26 mm, er ist um 0,14 mm geringer als erwartet. Der durchschnittliche Spitze-Tal-Wert des Sensors ergibt 0,12 mm und weicht somit um 0,03 mm von der Theorie (0,15 mm) ab.

**Vergleichsmessung bei 1150 m/min:****Abbildung 4-16: Vergleichsmessung bei 2,4 mm Ringdicke und 1150 m/min**

**Schauglasmesswerte:** Der Schauglasmesswert ergibt durchgehend ein Niveau von 4 mm. Grundsätzlich ist dies ein positives Schauglasmesswertverhalten. Aufgrund der Füllmenge von 2,4 mm sollte der Messwert allerdings durchgehend bei 2 mm anstatt bei 4 mm liegen. Ein präziser Niveau-Verlauf kann dadurch aber nicht abgebildet werden. Der Mittelwert des Schauglases liegt somit um exakt 1,6 mm zu hoch.

**Sensormesswerte:** Bei dieser Auswertung ist ein periodisches Sensorsignal wieder deutlich zu erkennen. Dabei stimmt die Frequenz mit dem theoretischen Niveau-Verlauf überein. Der Durchschnitt der Sensorwerte ergibt in diesem Fall 2,9 mm und ist somit bereits um 0,5 mm zu hoch. Der mittlere Spitze-Tal-Wert des Sensors (0,26 mm) ist um 0,15 mm größer als theoretisch (0,11 mm) ermittelt.

### 4.3.2.3 Messauswertungen bei theoretischer Ringdicke 4,4 mm

#### Vergleichsmessung bei 600 m/min:

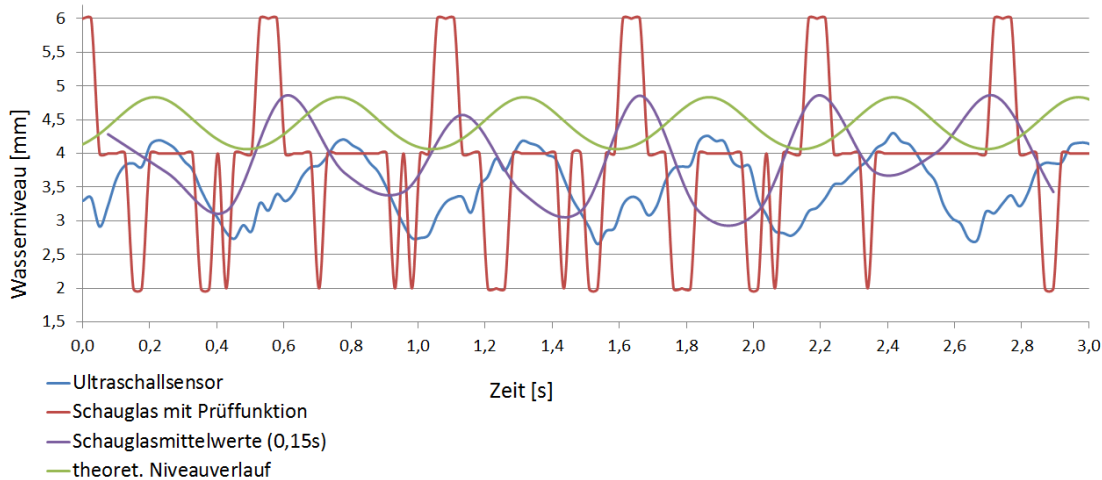
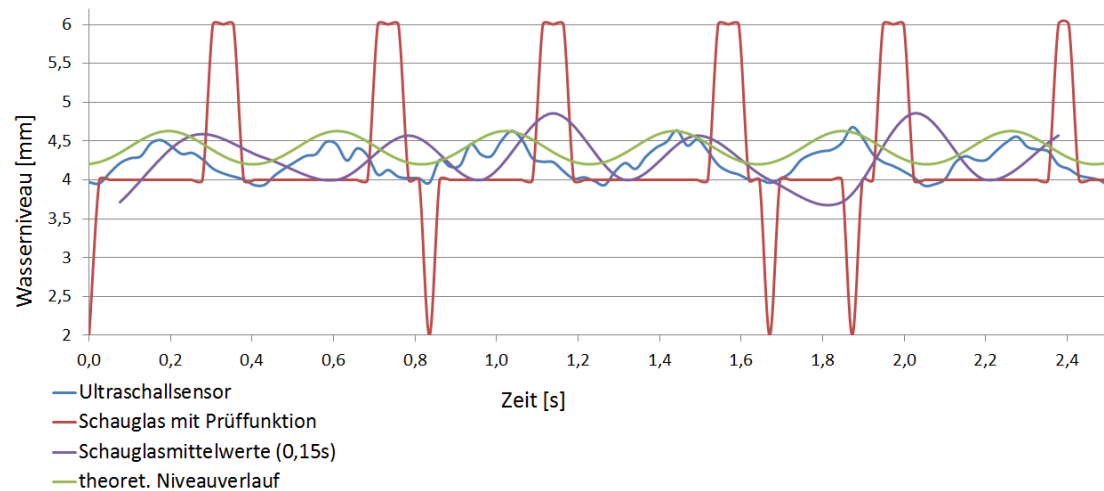


Abbildung 4-17: Vergleichsmessung bei 4,4 mm Ringdicke und 600 m/min

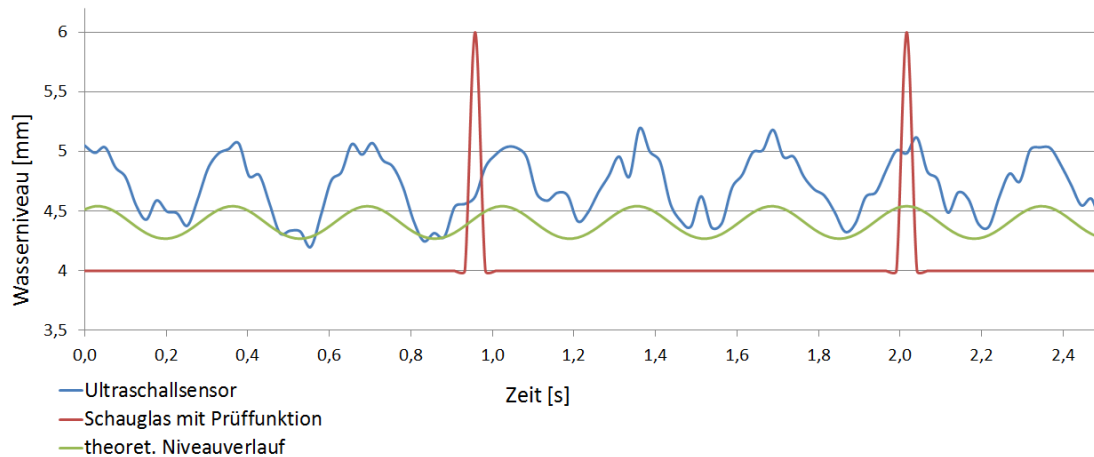
**Schauglasmesswerte:** Trotz einer theoretischen Wasserringdicke von 4,4 mm springt der Schauglasmesswert regelmäßig auf ein Niveau von 6 mm und fällt ebenso regelmäßig auf ein Niveau von 2 mm. Es resultiert ein periodisch schwankender Mittelwertverlauf, dessen Ausschläge im Bereich des Ultraschallsensors liegen, welcher aber zum Sensorverlauf verschoben ist. Die Frequenz stimmt mit der Theorie überein. Anhand dieser Auswertung könnten somit die Schauglasmittelwerte für einen Niveau-Verlauf herangezogen werden. Der Schauglasdurchschnitt (3,9 mm) liegt im Vergleich zu der theoretischen Ringdicke (4,4 mm) um 0,50 mm zu tief.

**Sensormesswerte:** Ein periodisches Schwingen des Sensorsignals ist deutlich zu erkennen, die Frequenz stimmt mit jener des theoretischen Niveau-Verlaufes überein. Der Mittelwert des Sensorsignals (3,53 mm) liegt um 0,87 mm zu tief, der mittlere Spitze-Tal-Wert (1,47 mm) ist um 0,7 mm größer als theoretisch ermittelt (0,77 mm).

**Vergleichsmessung bei 800 m/min:****Abbildung 4-18: Vergleichsmessung bei 4,4 mm Ringdicke und 800 m/min**

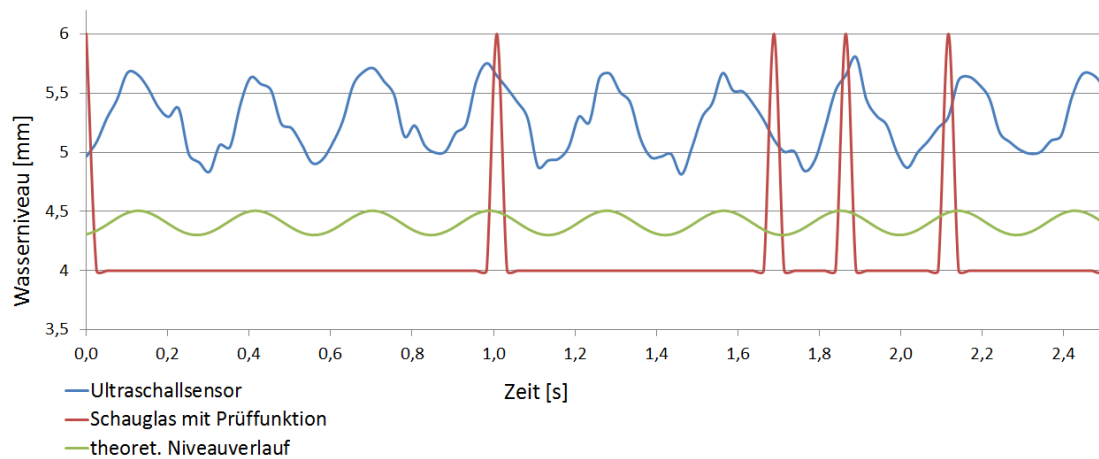
**Schauglasmesswerte:** Der Schauglasmesswert springt einmal pro Umdrehung auf ein Niveau von 6 mm. Der Messwert fällt aber auch unregelmäßig auf ein Niveau von 2 mm ab. Der Verlauf der Schauglasmittelwerte ist dem Sensorverlauf und der Theorie sehr ähnlich, jedoch etwas verschoben. Ausschläge und Frequenz stimmen annähernd überein. Auch in diesem Fall kann der Ringdickenverlauf durch Mittelwertbildung der Schauglasmesswerte bestimmt werden. Der Durchschnitt der Schauglasmesswerte (4,26 mm) ist im Bezug zum theoretischen Niveau-Mittelwert (4,4 mm) um 0,14 mm zu gering.

**Sensormesswerte:** Der Sensor beschreibt erneut den periodischen Ringdickenverlauf. Der Mittelwert des Ultraschallsensors (4,23 mm) ist im Bezug zum theoretischen Niveau um 0,17 mm zu gering, der durchschnittliche Spitze-Tal-Wert (0,56 mm) um 0,13 mm größer als erwartet (0,43 mm).

**Vergleichsmessung bei 1000 m/min:****Abbildung 4-19: Vergleichsmessung bei 4,4 mm Ringdicke und 1000 m/min**

**Schauglasmesswerte:** Die Schauglasmesswerte ergeben annähernd durchgängig ein konstantes Niveau von 4 mm, was für eine theoretische Füllmenge von 4,4 mm in Ordnung ist. Nur selten zeigt der Messwert eine Niveau-Spitze von 6 mm. Eine Mittelwertbildung ergibt somit keinen Sinn und der Niveau-Verlauf wird durch die Schauglasauswertung nicht präzise beschrieben. Der durchschnittliche Schauglasmesswert (4,04 mm) liegt um 0,36 mm niedriger als jener des theoretischen Niveau-Verlaufes (4,4 mm).

**Sensormesswerte:** Das periodische Schwingen der Sensormesswerte ist vorhanden. Die Periodendauer stimmt mit jener des errechneten Niveau-Verlaufes überein. Der Mittelwert des Sensors (4,71 mm) liegt um 0,31 mm höher als jener des theoretischen Niveau-Verlaufes. Der mittlere Spitze-Tal-Wert des Sensors (0,77 mm) ist im Vergleich zur Theorie (0,27 mm) um 0,5 mm zu hoch.

**Vergleichsmessung bei 1150 m/min:****Abbildung 4-20: Vergleichsmessung bei 4,4 mm Ringdicke und 1150 m/min**

**Schauglasmesswerte:** Die Schauglasmesswerte zeigen größtenteils ein Niveau von 4 mm. Erneut gibt es aber Zeitpunkte, bei denen das Niveau im Schauglas auf 6 mm ansteigt. Dies passiert allerdings zu unregelmäßig, sodass eine Mittelwertbildung der Schauglasmesswerte nicht sinnvoll ist. Erneut kann das Schauglasmessprinzip den Niveau-Verlauf nicht präzise beschreiben. Der Durchschnitt der Schauglasmesswerte (4,12 mm) liegt hierbei um 0,28 mm tiefer als das theoretische mittlere Niveau (4,4 mm).

**Sensormesswerte:** Auch bei diesem Versuch zeigt der Sensor eine periodisch schwankende Ringdicke. Der Durchschnitt der Sensorwerte (5,28 mm) weicht um 0,88 mm vom theoretischen Niveau ab. Der durchschnittliche Spitze-Tal-Wert des Sensors liegt mit 0,71 mm um 0,5 mm höher als theoretisch erwartet (0,21 mm).



#### 4.3.2.4 Messauswertungen bei theoretischer Ringdicke 10 mm

##### Vergleichsmessung bei 670 m/min:

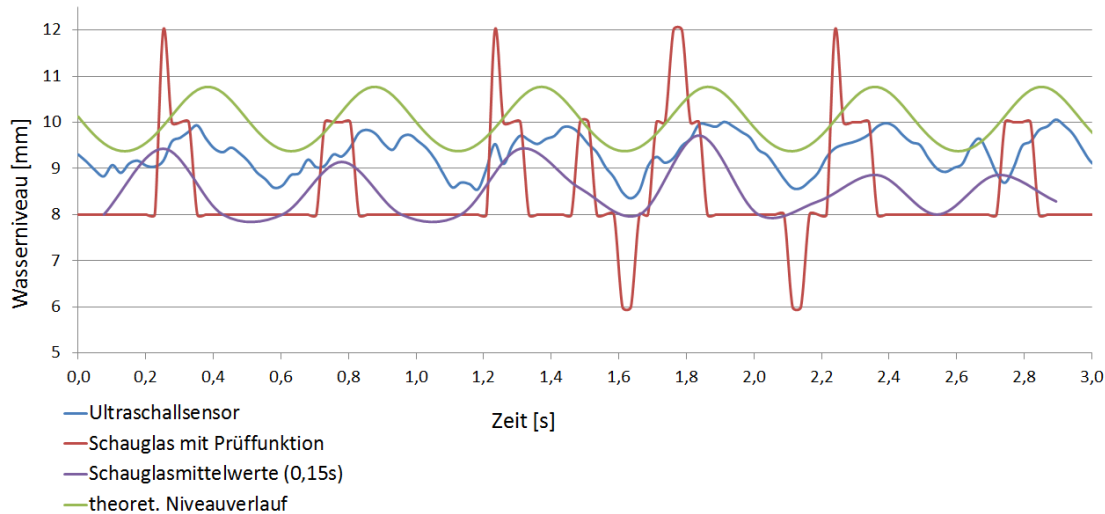
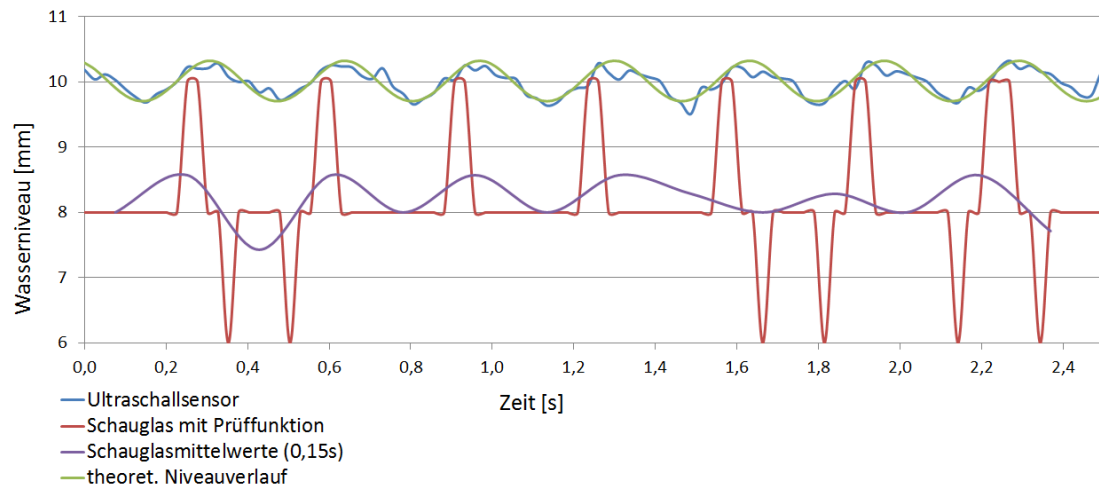


Abbildung 4-21: Vergleichsmessung bei 10 mm Ringdicke und 670 m/min

**Schauglasmesswerte:** Beim Vergleich mit dem theoretischen Niveau-Verlauf springt das Schauglassignal bei diesem Versuch regelmäßig zum richtigen Zeitpunkt auf ein höheres Niveau als 8 mm. Allerdings erreicht es einen Füllstand von 12 mm, obwohl theoretisch 10 mm nicht überschritten werden dürften. Zudem gibt es Zeitpunkte an denen es auf 6 mm abfällt. Der Mittelwertverlauf stimmt allerdings bezüglich Ausschlag und Periodendauer annähernd mit der Theorie und dem Sensorverlauf überein. In diesem Fall können die Schauglasmittelwerte zum Bestimmen des Niveau-Verhaltens herangezogen werden. Der durchschnittliche Schauglasmesswert (8,5 mm) liegt um 1,5 mm niedriger als das theoretische mittlere Niveau (10 mm).

**Sensormesswerte:** Der Sensor zeigt einen, der Theorie sehr ähnlichen, Niveau-Verlauf. Das durchschnittliche gemessene Sensor-Niveau (9,32 mm) ist um 0,68 mm geringer als der theoretische Füllstand. Der mittlere Spitze-Tal-Wert des Sensors (1,16 mm) ergibt 0,24 mm weniger als theoretisch erwartet (1,4 mm).

**Vergleichsmessung bei 1000 m/min:****Abbildung 4-22: Vergleichsmessung bei 10 mm Ringdicke und 1000 m/min**

**Schauglasmesswerte:** Der Verlauf der Schauglasmesswerte zwischen 8 mm und 10 mm ist völlig korrekt, da bei jedem Überschreiten des Füllstandes von 10 mm dies ebenfalls durch die Schauglasauswertung dargestellt wird. Allerdings fällt der Schauglasmesswert auch immer wieder auf ein Niveau von 6 mm. Bei der Mittelwertbildung ergibt sich ein Verlauf, der bezüglich Ausschlag und Frequenz zu einem Großteil den theoretischen Erwartungen entspricht. Folglich wird auch bei diesem Versuch der Ringdickenverlauf durch Mittelwertbildung der Schauglasmesswerte dargestellt. Der mittlere Schauglasmesswert (8,18 mm) weicht um 1,82 mm vom theoretischen Füllstand (10 mm) ab.

**Sensormesswerte:** Bei diesem Versuch zeigen die Sensormesswerte und der theoretische Niveau-Verlauf eine beachtlich gute Übereinstimmung. Der Sensormittelwert (9,99 mm) liegt um nur 0,01 mm unterhalb des theoretischen mittleren Niveaus. Auch der durchschnittliche Spitze-Tal-Wert des Sensors (0,53 mm) ist um nur 0,09 mm geringer als theoretisch ermittelt (0,62 mm).

#### 4.3.2.5 Auswertungsübersicht Wasserring-Betrieb

Folgende Tabelle zeigt die bei Wasserring-Betrieb ermittelten, durchschnittlichen Füllstände des Ultraschallsensors und der Schauglasauswertung mit Prüffunktion, sowie deren Abweichungen von den jeweiligen theoretischen mittleren Ringdicken. Des Weiteren sind der mittlere Spitze-Tal-Wert des Sensors und dessen Abweichung zur Theorie angeführt.

Geschwindigkeit	Mittlere Ringdicke			Spitze-Tal-Wert				Mittlere Ringdicke		
	US	US-Abw		Theorie	US	US-Abw		SG mit PF	SG mit PF-Abw	
m/min	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]
	Theoretische mittlere Ringdicke: 2mm									
600	0,98	-1,02	-51%	0,35	0,30	-0,05	-14%	2,00	0,00	0%
800	1,81	-0,19	-10%	0,19	0,15	-0,04	-21%	2,00	0,00	0%
1000	2,08	0,08	4%	0,12	0,08	-0,04	-33%	2,00	0,00	0%
1150	2,30	0,30	15%	0,09	0,07	-0,02	-22%	2,00	0,00	0%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 2,4mm									
600	1,89	-0,51	-21%	0,42	0,57	0,15	36%	3,69	1,29	54%
800	1,90	-0,50	-21%	0,23	0,16	-0,07	-30%	2,89	0,49	20%
1000	2,26	-0,14	-6%	0,15	0,12	-0,03	-20%	3,09	0,69	29%
1150	2,90	0,50	21%	0,11	0,26	0,15	136%	4,00	1,60	67%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 2,8mm									
600	2,13	-0,67	-24%	0,49	0,42	-0,07	-14%	2,60	-0,20	-7%
800	2,32	-0,48	-17%	0,27	0,29	0,02	7%	2,87	0,07	3%
1000	2,78	-0,02	-1%	0,17	0,25	0,08	47%	3,98	1,18	42%
1150	3,36	0,56	20%	0,13	0,40	0,27	208%	4,00	1,20	43%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 3,2mm									
600	2,55	-0,65	-20%	0,56	1,05	0,49	88%	3,32	0,12	4%
800	2,83	-0,37	-12%	0,31	0,36	0,05	16%	3,96	0,76	24%
1000	3,43	0,23	7%	0,20	0,33	0,13	65%	4,00	0,80	25%
1150	3,84	0,64	20%	0,15	0,30	0,15	100%	4,00	0,80	25%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 3,6mm									
600	2,92	-0,68	-19%	0,63	1,55	0,92	146%	4,00	0,40	11%
800	3,70	0,10	3%	0,35	0,26	-0,09	-26%	4,00	0,40	11%
1000	4,02	0,42	12%	0,22	0,43	0,21	95%	3,98	0,38	11%
1150	4,38	0,78	22%	0,17	0,29	0,12	71%	4,32	0,72	20%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 4mm									
600	3,03	-0,97	-24%	0,70	1,54	0,84	120%	4,00	0,00	0%
800	3,82	-0,18	-5%	0,39	0,32	-0,07	-18%	3,98	-0,02	-1%
1000	4,40	0,40	10%	0,25	0,47	0,22	88%	4,00	0,00	0%
1150	4,77	0,77	19%	0,19	0,56	0,37	195%	4,42	0,42	11%

Tabelle 4-10: Auswertungsübersicht Wasserring-Betrieb (1)

Geschwindigkeit	Mittlere Ringdicke			Spitze-Tal-Wert				Mittlere Ringdicke		
	US	US-Abw		Theorie	US	US-Abw		SG mit PF	SG mit PF-Abw	
m/min	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]
	Theoretische mittlere Ringdicke: 4,4mm									
600	3,53	-0,87	-20%	0,77	1,47	0,70	91%	3,90	-0,50	-11%
800	4,23	-0,17	-4%	0,43	0,56	0,13	30%	4,26	-0,14	-3%
1000	4,71	0,31	7%	0,27	0,77	0,50	185%	4,04	-0,36	-8%
1150	5,28	0,88	20%	0,21	0,71	0,50	238%	4,12	-0,28	-6%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 4,8mm									
600	3,56	-1,24	-26%	0,84	0,95	0,11	13%	4,17	-0,63	-13%
800	4,20	-0,60	-13%	0,47	0,76	0,29	62%	4,71	-0,09	-2%
1000	4,75	-0,05	-1%	0,30	0,37	0,07	23%	5,09	0,29	6%
1150	5,48	0,68	14%	0,23	0,24	0,01	4%	5,98	1,18	25%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 5,2mm									
600	6,40	1,20	23%	0,91	1,53	0,62	68%	7,27	2,07	40%
800	6,84	1,64	32%	0,51	1,08	0,57	112%	7,39	2,19	42%
1000	7,36	2,16	42%	0,32	0,39	0,07	22%	7,70	2,50	48%
1150	7,55	2,35	45%	0,24	0,33	0,09	38%	7,94	2,74	53%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 5,6mm									
600	6,68	1,08	19%	0,98	1,46	0,48	49%	7,67	2,07	37%
800	6,80	1,20	21%	0,55	0,85	0,30	55%	7,50	1,90	34%
1000	7,35	1,75	31%	0,35	0,52	0,17	49%	7,52	1,92	34%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 6mm									
600	6,88	0,88	15%	1,05	1,31	0,26	25%	7,74	1,74	29%
800	7,05	1,05	18%	0,58	0,62	0,04	7%	7,45	1,45	24%
1000	7,49	1,49	25%	0,37	0,68	0,31	84%	7,68	1,68	28%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 6,4mm									
600	6,84	0,44	7%	1,12	1,06	-0,06	-5%	7,92	1,52	24%
800	7,12	0,72	11%	0,62	0,84	0,22	35%	7,82	1,42	22%
1000	7,42	1,02	16%	0,40	0,86	0,46	115%	7,86	1,46	23%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 6,8mm									
600	6,97	0,17	3%	1,19	2,22	1,03	87%	7,75	0,95	14%
800	7,21	0,41	6%	0,66	0,79	0,13	20%	7,86	1,06	16%
1000	7,69	0,89	13%	0,42	0,80	0,38	90%	7,94	1,14	17%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 8mm									
670	8,04	0,04	0%	1,12	1,11	-0,01	-1%	7,07	-0,93	-12%
1000	8,42	0,42	5%	0,50	0,76	0,26	52%	8,00	0,00	0%
	Theoretische mittlere Ringdicke: 10mm									
670	9,32	-0,68	-7%	1,40	1,16	-0,24	-17%	8,50	-1,50	-15%
1000	9,99	-0,01	0%	0,62	0,53	-0,09	-15%	8,18	-1,82	-18%

Tabelle 4-11: Auswertungsübersicht Wasserring-Betrieb (2)

#### 4.3.2.6 Allgemeine Messauswertung Wasserring-Betrieb

Im ersten Diagramm wird die Abweichung der durchschnittlichen Sensormesswerte vom theoretischen Füllstand-Niveau bei den einzelnen Versuchen gezeigt. Berechnet wurde folgendermaßen: Durchschnittlicher Sensormesswert – theoretisches Füllstand-Niveau.

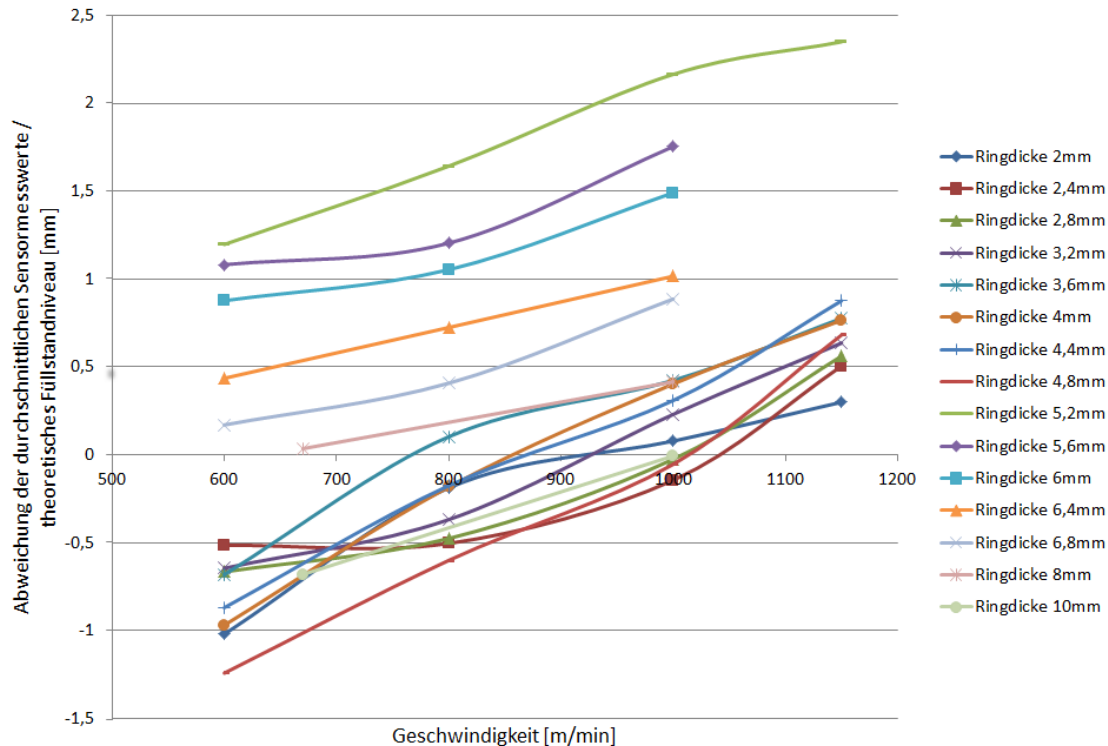
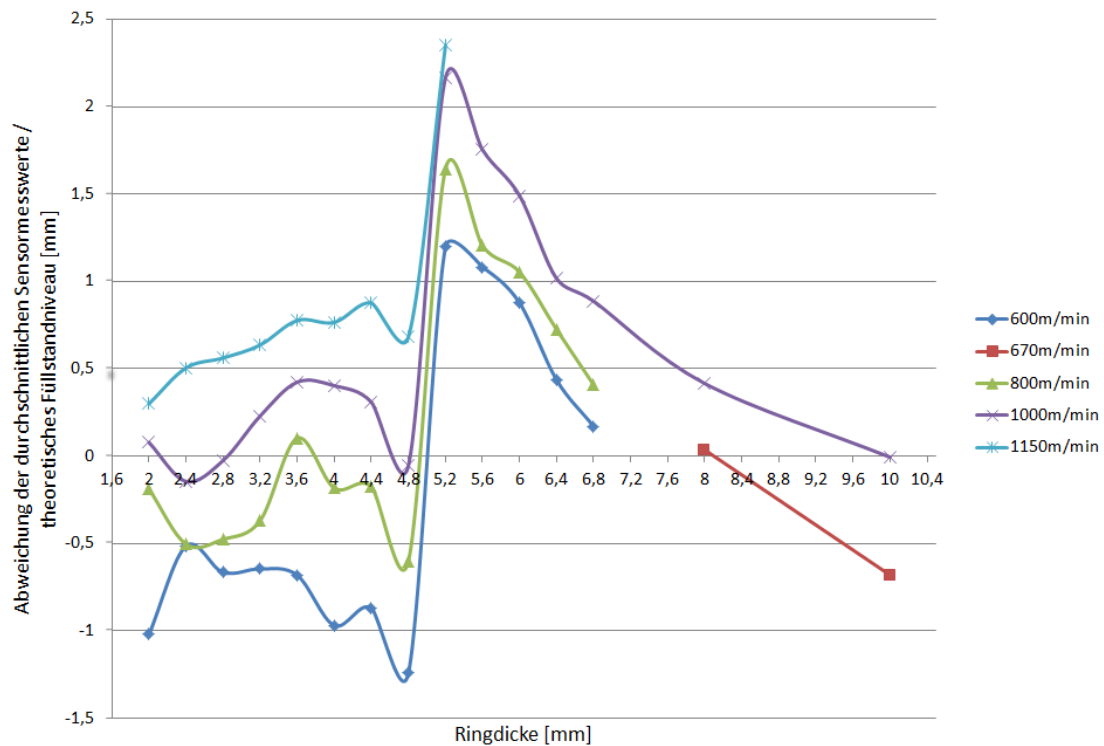


Abbildung 4-23: Abweichung durchschn. Sensormesswert / theoret. Füllstand (1)

Das Diagramm zeigt, dass die Abweichungen der durchschnittlichen Sensormesswerte im Bezug zum theoretischen Füllstand bei den Versuchen mit einer Ringdicke von 2 mm bis 4,8 mm sowie mit der Ringdicke von 8 mm und 10 mm sehr eng beisammen liegen. Bei dem Versuch mit einer Ringdicke von 5,2 mm liegen die Abweichungen allerdings um rund 1,75 mm höher. Die Abweichungen der darauffolgenden Versuche werden wieder geringer und nähern sich jenem Bereich, in dem die ersten Versuche beisammen liegen.

Um dies deutlicher darzustellen, wurde das Diagramm mit nachfolgender Darstellungsvariante erstellt.

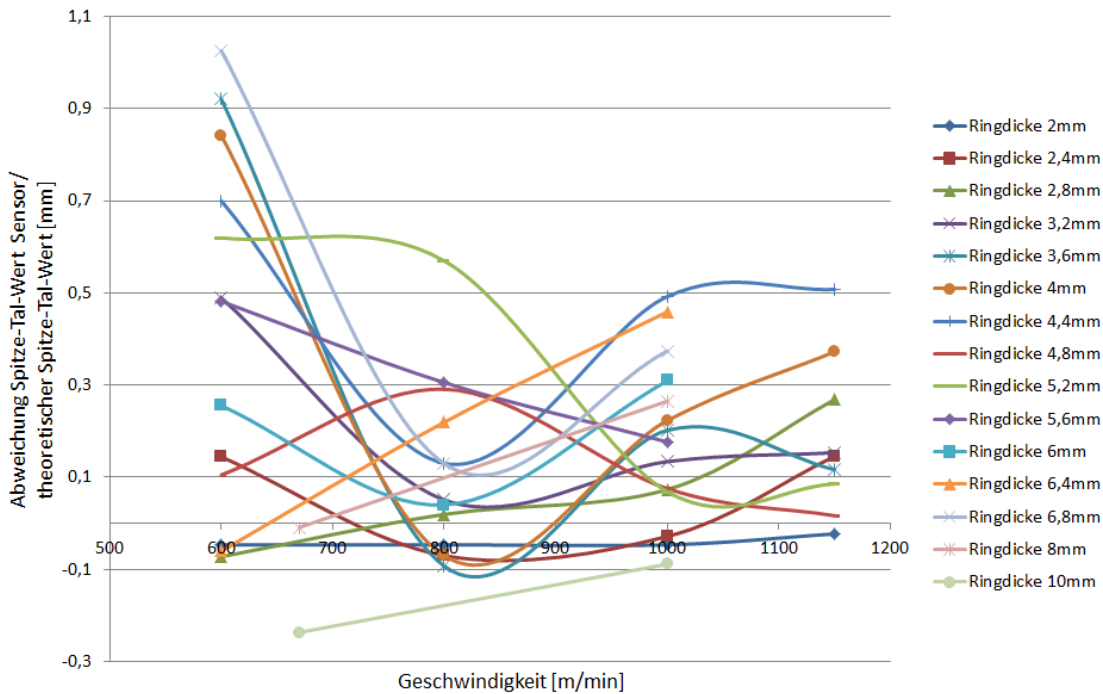


**Abbildung 4-24: Abweichung durchschn. Sensormesswert / theoret. Füllstand (2)**

Es scheint, als sei dies durch die unterschiedlichen Versuchsabläufe beeinflusst worden. Bis zu der Versuchsdurchführung mit einer theoretischen Ringdicke von 5,2 mm wurde der Zylinder nach jeder Versuchsreihe entleert und mit der erforderlichen Wassermenge neu gefüllt. Gleiches gilt für die Versuchsreihen mit einem theoretischen Wasser-Niveau von 8 mm und 10 mm. Möglicherweise war die vorgesehene Wassermenge für die Ringdicke von 5,2 mm nicht korrekt. Ab dieser Versuchsreihe wurde der Zylinder nicht mehr entleert, sondern lediglich die benötigte Differenz an Wasservolumen hinzugefüllt. Somit wirkt sich das falsch definierte Volumen auch auf die Abweichungen der folgenden Versuche aus. Fragwürdig ist allerdings, warum diese von einer Versuchsreihe zur nächsten geringer werden, und nicht im Bereich der Abweichungen des 5,2 mm Versuches bleiben. Eventuell ist dies aber auf den Wasserverlust aufgrund geringer Leckagen, der sich bei den aneinandergereihten Versuchsreihen (es wurde nur das erforderliche Differenzvolumen aufgefüllt) dann in dieser Weise darstellt, zurückzuführen.

Folgende Eigenschaft ist allerdings bei allen Versuchsreihen gleich: Bei Steigerung der Geschwindigkeit tritt auch ein Anstieg der Sensormesswerte auf. Den Überlegungen zufolge ergibt sich der Schluss, dass dies wohl auf die Zentrifugalkraft, welche auf den Ultraschallsensor inklusive dessen Konsole wirkt, zurückzuführen ist. Je höher die Geschwindigkeit, umso mehr biegt sich die Konstruktion inklusive Sensor in Richtung der Wasseroberfläche und täuscht somit ein steigendes Wasser-Niveau vor.

Folgendes Diagramm zeigt die Abweichung des durchschnittlichen Spitze-Tal-Wertes des Ultraschallsensors im Bezug zum theoretischen Spitze-Tal-Wert bei den einzelnen Versuchen. Die Berechnung erfolgte durch Subtraktion: Spitze-Tal-Wert Ultraschallsensor – Spitze-Tal-Wert Theorie:



**Abbildung 4-25: Abweichung Spitze-Tal-Wert Sensor / Theorie**

Die Auswertung der Abweichung des Spitze-Tal-Wertes des Sensors im Vergleich zur Theorie zeigt, dass diese beim Großteil der Versuche innerhalb von -0,1 mm und +0,5 mm liegt. Nur wenige Versuchspunkte, im Wesentlichen bei 600 m/min überschreiten eine Abweichung von +0,5 mm. Folglich zeigt diese Vergleichsauswertung, dass Niveau-Änderungen vom Ultraschallsensor durchgängig erkannt und ausgewertet werden. Dabei zeigen die Auswertungen diese eher etwas größer, als theoretisch erwartet.

Nachfolgendes Diagramm zeigt die Abweichung der durchschnittlichen Schauglasmesswerte vom theoretischen Füllstand-Niveau bei den einzelnen Versuchen. Es wurde folgendermaßen berechnet: Durchschnittlicher Schauglasmesswert – theoretisches Füllstand-Niveau.

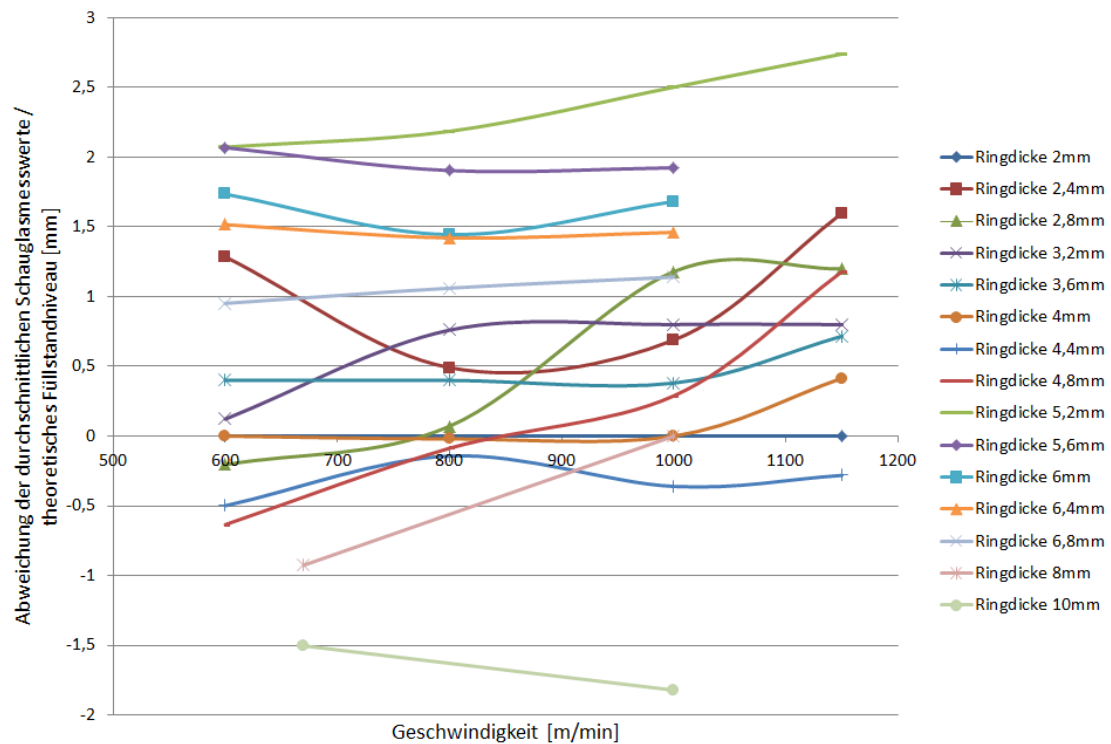


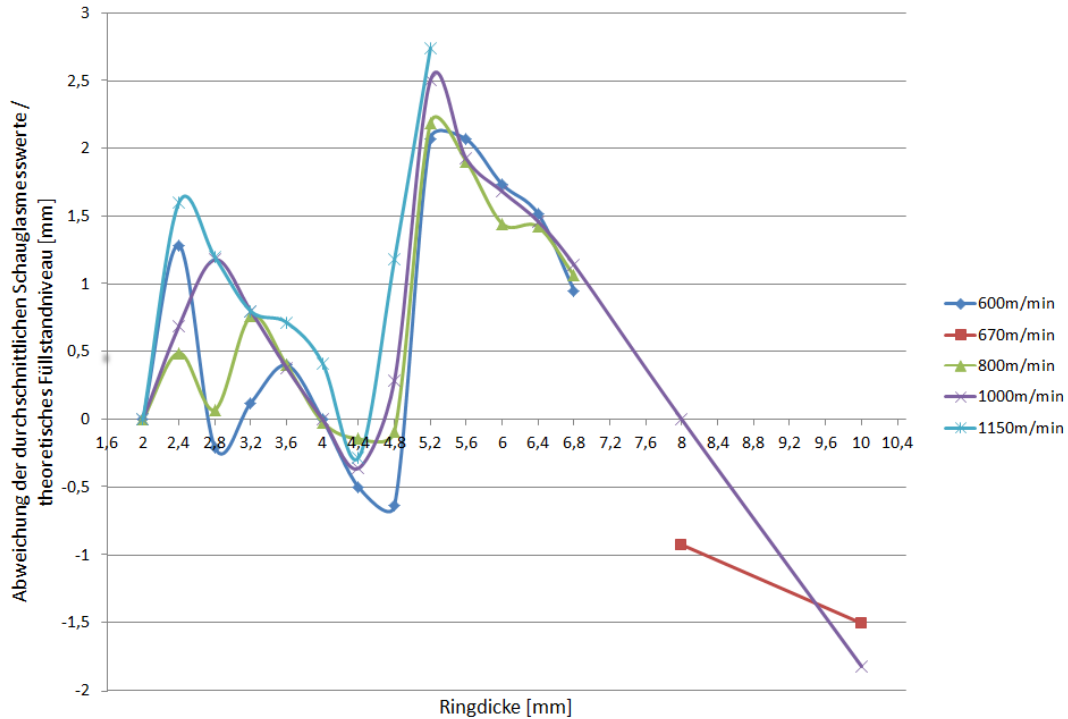
Abbildung 4-26: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / theoret. Füllstand (1)

Diese Auswertung zeigt zum Teil einen ähnlichen Verlauf wie die Abweichungen der durchschnittlichen Sensormesswerte (Abb. 4-23, 4-24). Die ersten Versuche bis einschließlich einer Ringdicke von 4,8 mm zeigen Abweichungen im Bereich von -0,6 mm bis +1,3 mm. Weitaus höher sind die Abweichungen beim Versuch mit einem theoretischen Niveau von 5,2 mm. Diese liegen zwischen +2,1 mm und +2,7 mm. Bei nachfolgenden Versuchen nähern sich die Abweichungen wieder dem Bereich der ersten Versuche. Nur die Auswertung bei einer Ringdicke von 10 mm ergibt eine Abweichung von -1,5 mm bzw. -1,8 mm.

Somit weist auch die Schauglasmessung beim Versuch mit einer Ringdicke von 5,2 mm auf ein falsch bemessenes Wasservolumen hin, was aufgrund der Abhängigkeit nachfolgender Versuche diese Abweichungen ebenfalls beeinflusst.



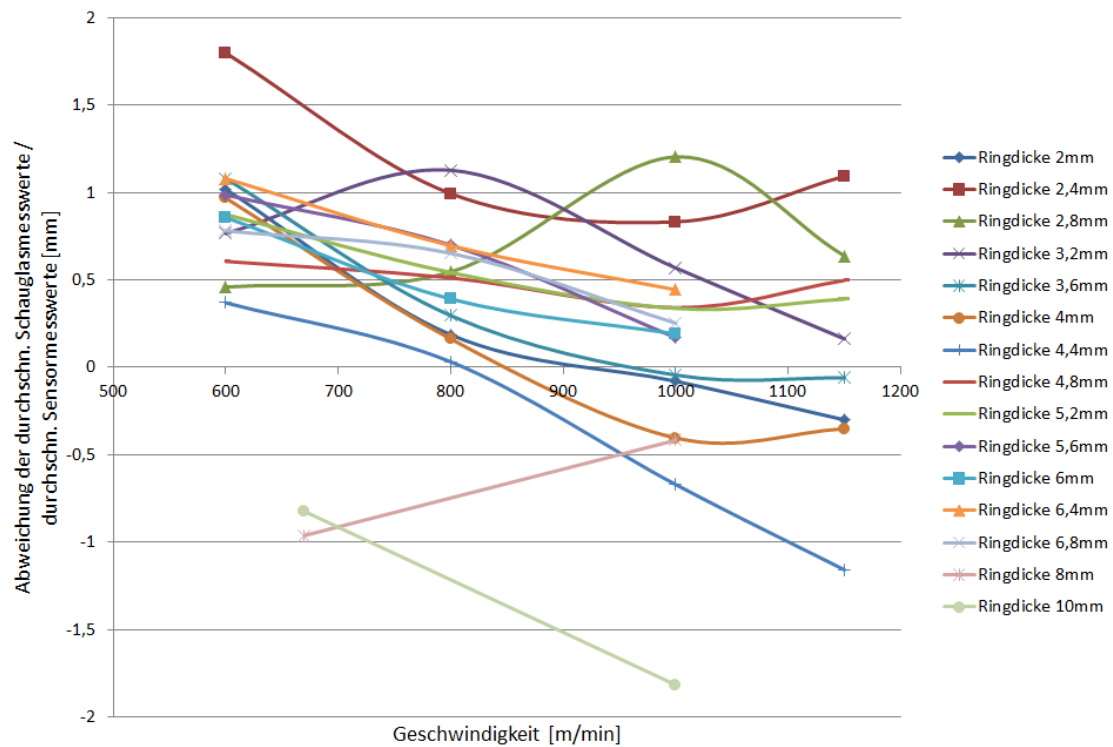
Erneut ist dies an der abgeänderten Darstellungsvariante des Diagramms wesentlich besser zu erkennen:



**Abbildung 4-27: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / theoret. Füllstand (2)**

Den Auswertungen zufolge weisen die durchschnittlichen Schauglasmesswerte im Vergleich zum theoretischen Füllstand ähnliche Abweichungen wie die Sensormittelwerte auf.

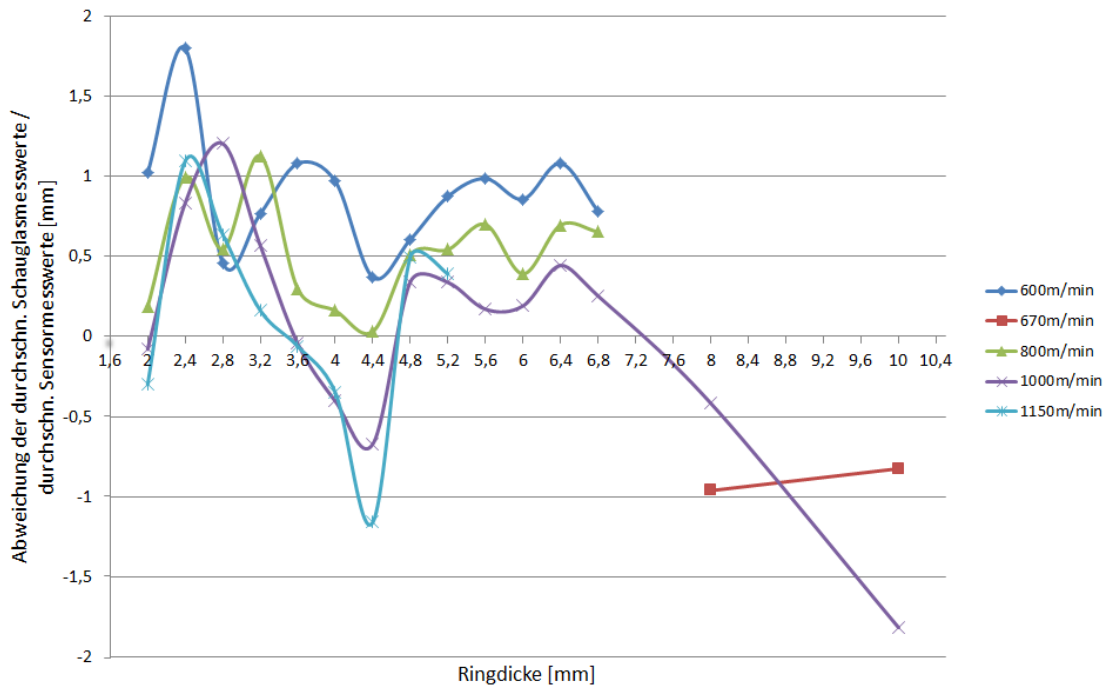
Im nächsten Diagramm ist die Abweichung der durchschnittlichen Schauglasmesswerte im Bezug zu den durchschnittlichen Sensormesswerten bei den einzelnen Versuchen dargestellt. Die Auswertung erfolgte durch Subtraktion: Durchschnittlicher Schauglasmesswert – durchschnittlicher Sensormesswert.



**Abbildung 4-28: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / durchschn. Sensormesswert (1)**

Die Vergleichsauswertung der Durchschnittswerte zeigt bei einigen Versuchen bei der Geschwindigkeit von 600 m/min eine ähnlich große Abweichung, die im Bereich von +0,5 mm bis +1,1 mm liegt. Bei Steigerung der Geschwindigkeit wird beim Großteil der Versuche die Abweichung geringer bzw. verschiebt sich in den negativen Bereich. Dies ist mit den geschwindigkeitsbeeinflussten Sensormesswerten zu begründen. Bei der Geschwindigkeit von 1000 m/min bzw. 1150 m/min liegt die Mehrheit der Abweichungen somit in einem Bereich von -0,4 mm bis +0,5 mm.

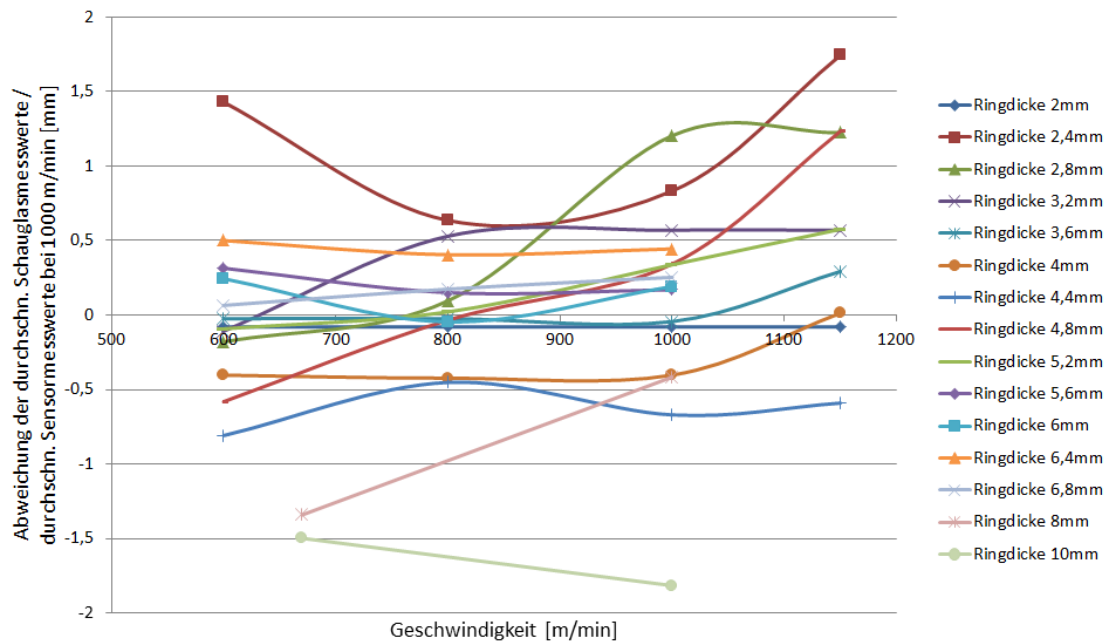
Darstellung der weiteren Diagrammvariante:



**Abbildung 4-29: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / durchschn. Sensormesswert (2)**

Wird das Diagramm in dieser Art zur Darstellung herangezogen, zeigen die Abweichungsverläufe bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchaus ähnliche Tendenzen. In diesen Bereichen ist der Abweichungsverlauf somit geschwindigkeitsunabhängig. Eine Beeinflussung kann beispielsweise durch die Positionierung der Messkontakte im Schauglas, oder prinzipiell durch das Messverhalten des Schauglases bei bestimmten Ringdicken, hervorgerufen werden.

Aufgrund des geschwindigkeitsbeeinflussten Sensormesswertes und der damit verbundenen Verfälschung der Abweichung von Sensormesswert zu Schauglasmesswert, wurden im letzten Diagramm alle durchschnittlichen Schauglasmesswerte einer Versuchsreihe auf einen der Füllmenge entsprechenden durchschnittlichen Sensormesswert bezogen. Da das Diagramm nach Abbildung 4-23 zeigt, dass einige Sensormesswerte bei einer Geschwindigkeit von 1000 m/min nur geringe Abweichungen zum theoretischen Füllstand aufweisen, wurden diese als Vergleichsmesswert der jeweiligen Versuchsreihe herangezogen. Die Abweichungen wurden folgendermaßen ermittelt: Durchschnittlicher Schauglasmesswert – durchschnittlicher Sensormesswert bei 1000 m/min.



**Abbildung 4-30: Abweichung durchschn. Schauglasmesswert / durchschn. Sensormesswert bei 1000 m/min**

Das Diagramm zeigt, dass einige Versuchsreihen eine annähernd konstante Abweichung von dem jeweiligen Vergleichsmesswert aufweisen und die Abweichungen im Bereich von -0,8 mm bis +0,6 mm konzentriert sind.

Somit liegen die durchschnittlichen Schauglasmesswerte zu einem wesentlichen Teil mit einer akzeptablen Ungenauigkeit im Bereich der durchschnittlichen Sensormesswerte und können unter Berücksichtigung möglicher Abweichungen zur Bestimmung des mittleren Füllstandes im Trockenzylinder herangezogen werden.



## 5 Zusammenfassung

Im Zuge der Diplomarbeit wurde ein Versuchszylinder zum Prüfen des Schauglasmesssystems aufgebaut. Dabei musste der ursprünglich vorgesehene Messaufbau mehrmals abgeändert bzw. optimiert werden, um eine Messauswertung zu ermöglichen. Nach Konfigurierung der WLAN-Verbindung und Einbindung der Messdatenauswertung in die firmeneigene Software, konnten die vorgesehenen Versuche durchgeführt werden. In späterer Folge wurden die Messergebnisse aufbereitet und die einzelnen Versuche ausgewertet.

Zusammenfassend kann folgendes zur Ultraschallsensor- bzw. Schauglasmessung gesagt werden:

Bei Sumpfbetrieb ist die Sensormessung zur Bestimmung des Niveau-Verlaufes geeignet. Bei der Schauglasmessung ist dies nur bis zu einer Geschwindigkeit von 80 m/min gewährleistet. Es muss allerdings unbedingt die Schauglasauswertung mit der eingebundenen Prüffunktion zur Anwendung kommen. Bei höheren Geschwindigkeiten erfolgt der Zu- bzw. Ablauf des Wassers im Schauglas nicht schnell genug. Der tatsächliche Wasserstand wird somit nicht richtig erfasst.

Bei der Auswertung der durchschnittlichen Ringdicke weisen beide Messsysteme wesentliche Abweichungen zum theoretischen Niveau auf. Sollte dennoch das Schauglas diesbezüglich herangezogen werden, ist die Auswertung mit Prüffunktion zu verwenden.

Ringbetrieb: Beim Ermitteln der mittleren Ringdicke weisen beide Messsysteme Abweichungen auf, die in einem ähnlich großen Bereich liegen und akzeptabel sind. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die Sensormessung bei der ausgeführten Konstruktion durch die Zentrifugalkraft beeinflusst wird. Beim Vergleich der beiden Messsysteme wurden somit ausschließlich Sensorauswertungen bei einer Geschwindigkeit von 1000 m/min herangezogen. Dabei sind die Abweichungen zwischen den beiden Messsystemen auf einen engen Bereich konzentriert. Dies spricht für die Genauigkeit der Messsysteme. Somit kann das Schauglasmessprinzip unter Berücksichtigung der möglichen Abweichungen zur Bestimmung der mittleren Kondensatfilmdicke herangezogen werden.

Der tatsächliche Ringdickenverlauf kann mit der Sensormessung erfasst werden. Der Ultraschallsensor erkennt Niveau-Änderungen und stellt diese ähnlich der Theorie dar. Dabei haben die Versuche gezeigt, dass Niveau-Schwankungen durch die Sensorauswertung meist etwas größer dargestellt werden, als theoretisch vorhanden. Eine derartige Beschreibung der Wasserfilmdicke kann mit dem Schauglasmessprinzip nicht erreicht werden. Detaillierte Auswertungen unterschiedlicher Versuchspunkte haben gezeigt, dass bei einem Teil der Versuche durch Mittelwertbildung der Schauglasmesswerte ein mit der

Theorie übereinstimmender Ringdickenverlauf erreicht wird. Bei einigen Versuchen war dies aber nicht zutreffend und die Mittelwerte ergeben Niveau-Verläufe, welche nicht der Realität entsprechen. Folglich kann das Schauglasmessprinzip zum präzisen Erfassen der aktuellen Kondensatfilmdicke an einer bestimmten Stelle des Trockenzyinders nicht herangezogen werden.

## Literatur

- [1] Schematische Darstellung einer Papiermaschine. URL:  
[http://www.pisec-zellstoff.at/downloads/schema\\_papiermaschine\\_DE.pdf](http://www.pisec-zellstoff.at/downloads/schema_papiermaschine_DE.pdf), verfügbar am 22. Juli 2012, 16:27
  
- [2] Foto einer Papiermaschine. URL:  
[http://www.voith.com/de/lb\\_VP\\_KingsLynn\\_PM7\\_09\\_WB\\_6230\\_0120\\_bearbeitet\\_09-02-2011.jpg](http://www.voith.com/de/lb_VP_KingsLynn_PM7_09_WB_6230_0120_bearbeitet_09-02-2011.jpg), verfügbar am 22. Juli 2012, 16:36
  
- [3] Die Papiermaschine und ihre Sektionen. URL:  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Papiermaschine>, verfügbar am 16. Juli 2012, 23:33
  
- [4] Störleisten. URL: <http://www.voith.com/en/products-services/paper/thermobars-2390.htm>, verfügbar am 16. November 2012, 01:07
  
- [5] Ultraschallsensor. URL:  
<http://www.microsonic.de/de/Produkte/micplus/STANDARDSENSOREN/mic25IUTC.htm>, verfügbar am 19. September 2012, 22:41
  
- [6] [info@schonlau-werke.de](mailto:info@schonlau-werke.de): Werkstoff – Normblatt Nr. 1600/5. URL:  
<http://schonlau-werke.de/de/getfile/werkstoffnormblatt>, verfügbar am 21. Juli 2012, 01:42
  
- [7] [info@faigle.com](mailto:info@faigle.com): Kunststoff – Materialdatenblatt. – Faigle Kunststoffe GmbH.



- 
- [8] robaproducts@leripa.com: Werkstoffrichtwerte. – Röchling Leripa Papertech GmbH & Co. KG
- [9] Füllstandschalter. URL:  
[http://www.conrad.de/ce/de/product/195731/?insert=U1&hk=WW2&utm\\_source=epro&utm\\_medium=seosite&utm\\_campaign=link&WT.mc\\_id=epro](http://www.conrad.de/ce/de/product/195731/?insert=U1&hk=WW2&utm_source=epro&utm_medium=seosite&utm_campaign=link&WT.mc_id=epro), verfügbar am 24. November 2012, 17:35
- [10] Sung-Ho, Hong: Chemical Industry and Technology Vol. 8, No. 1 - Neenah, WI, U.S.A., 1990
- [11] Wedel Gregory L. Timm Gerald L.: Drive Power and Torque in Papermachine Dryers. – The Johnson Corporation, Three Rivers, Michigan, USA

## Anlagen

Teil 1 ..... A-I

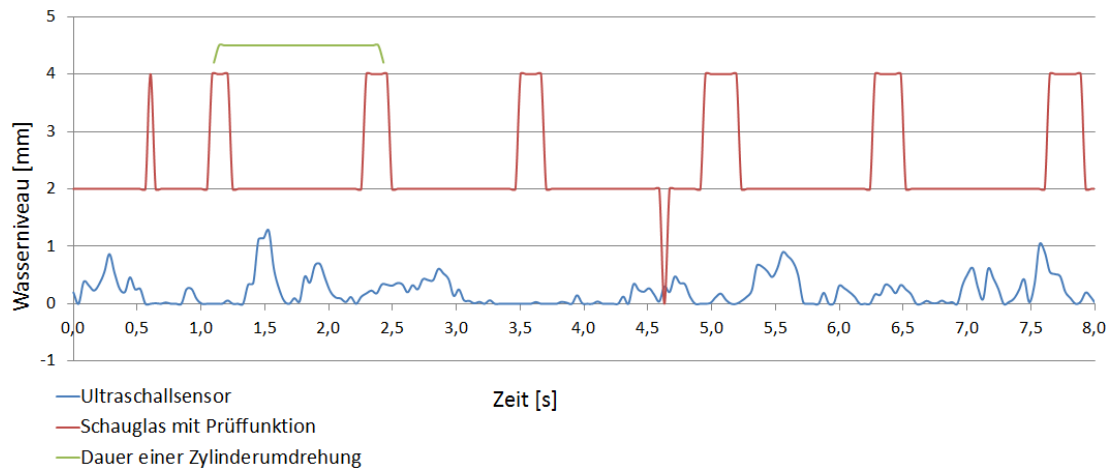
Teil 2 ..... A-IV



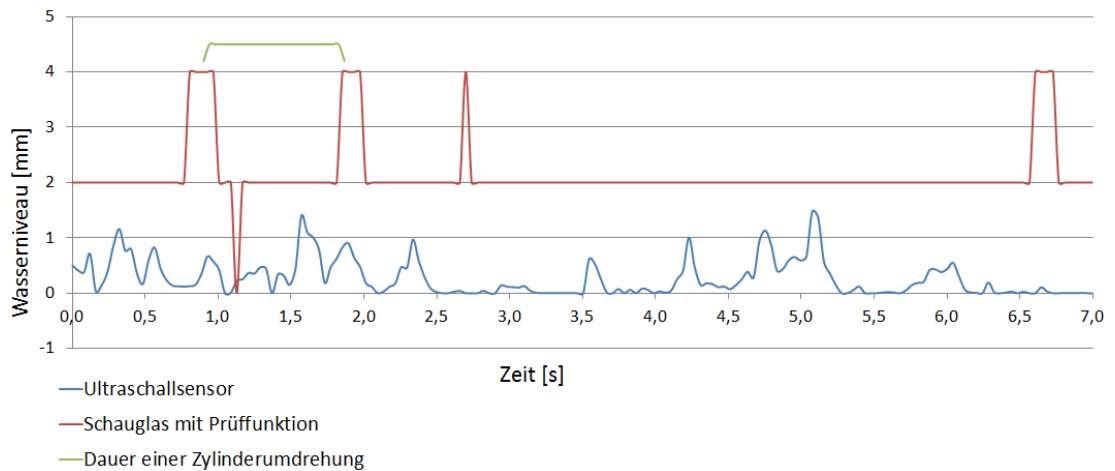
# Anlagen, Teil 1

## Weitere Messauswertungen bei Wassersumpf-Betrieb:

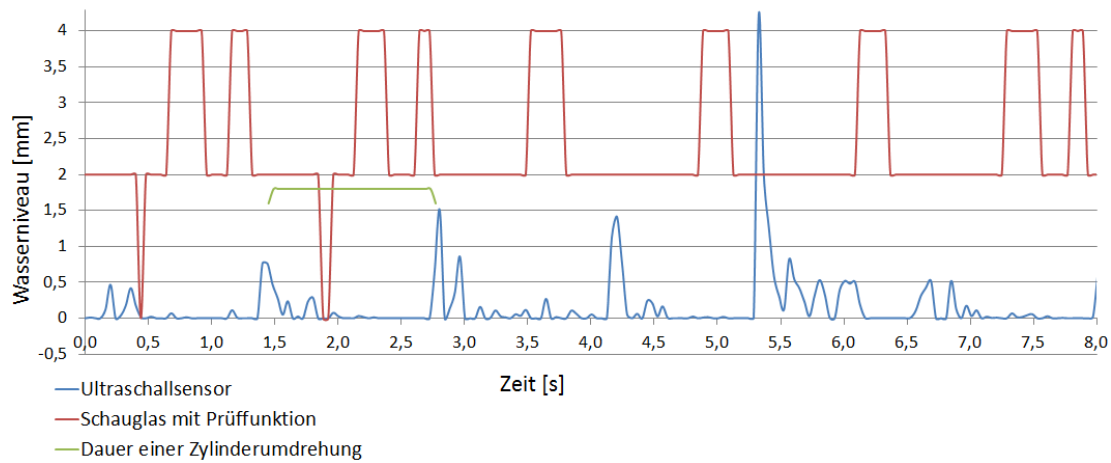
Segmentfüllstand 20 mm, Geschwindigkeit 250 m/min:



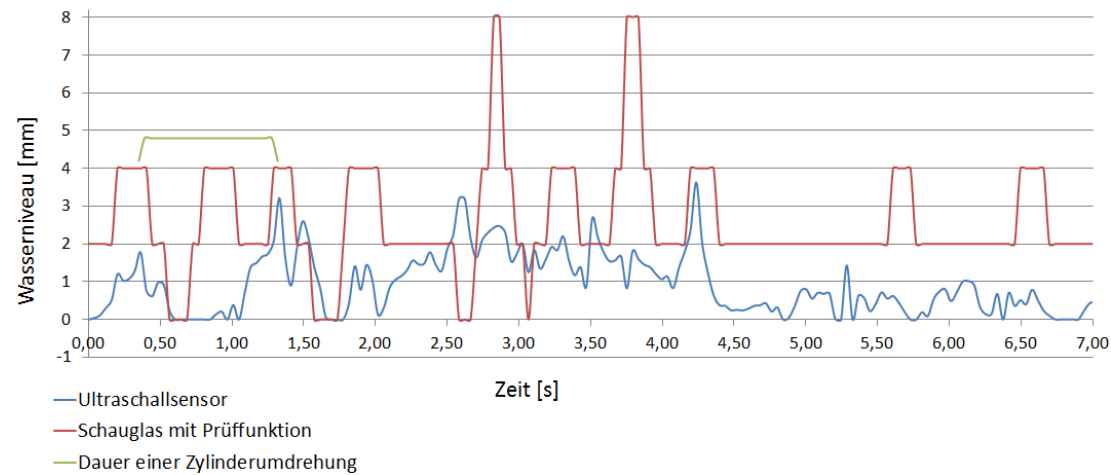
Segmentfüllstand 20 mm, Geschwindigkeit 340 m/min:



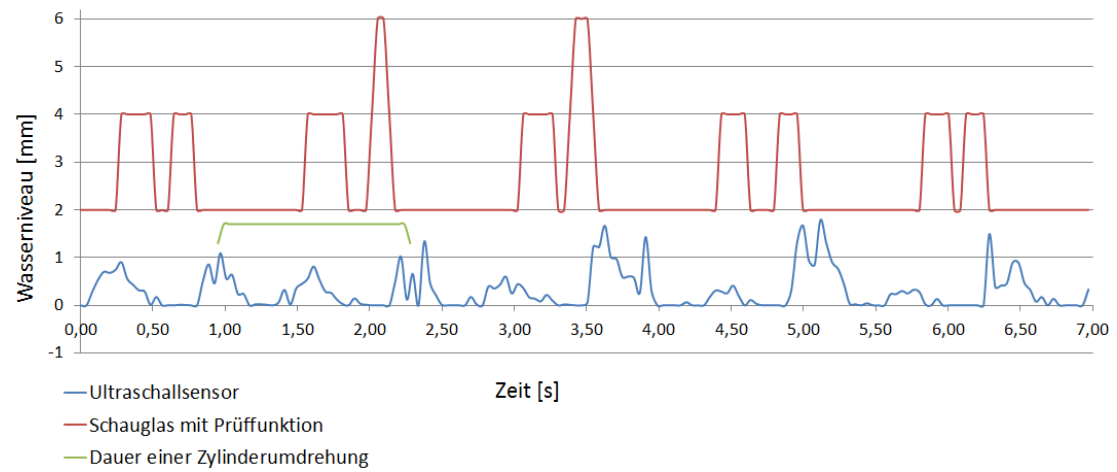
Segmentfüllstand 34 mm, Geschwindigkeit 250 m/min:



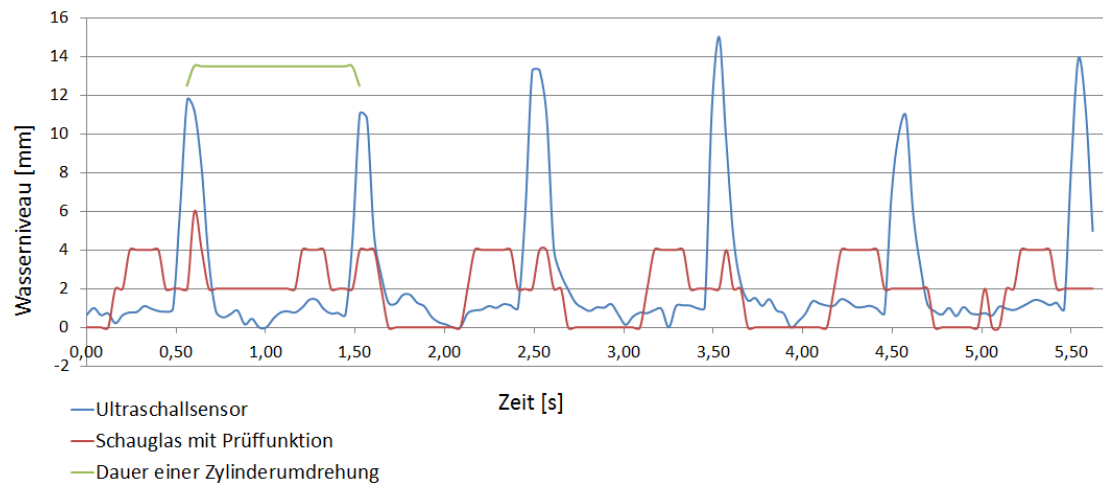
Segmentfüllstand 34 mm, Geschwindigkeit 340 m/min:



Segmentfüllstand 53,9 mm, Geschwindigkeit 250 m/min:



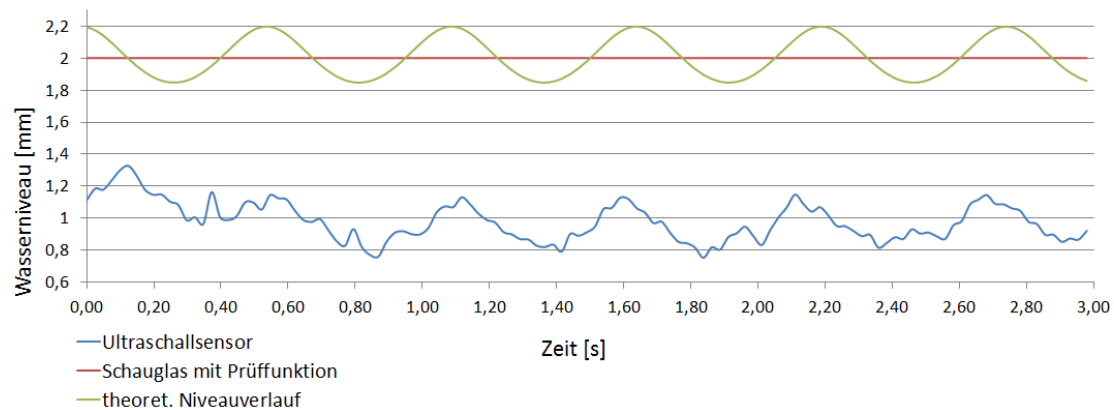
Segmentfüllstand 53,9 mm, Geschwindigkeit 340 m/min:



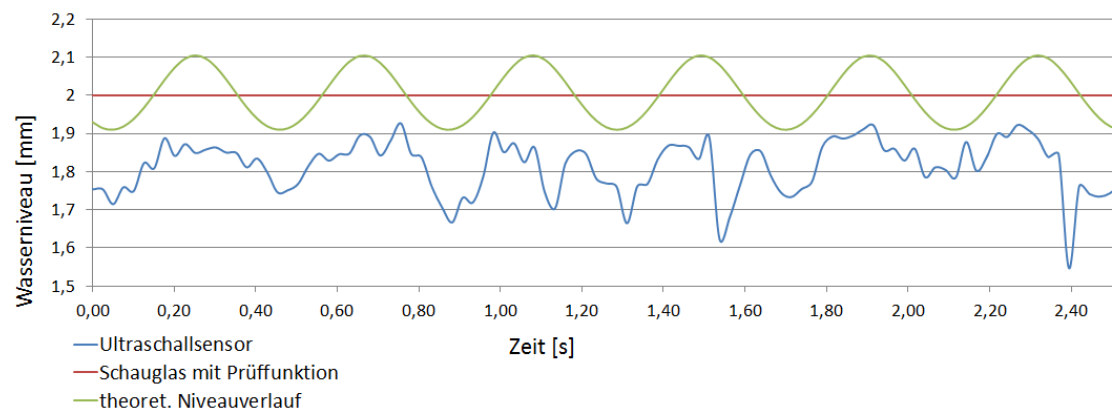
## Anlagen, Teil 2

### Weitere Messauswertungen bei Wasserring-Betrieb:

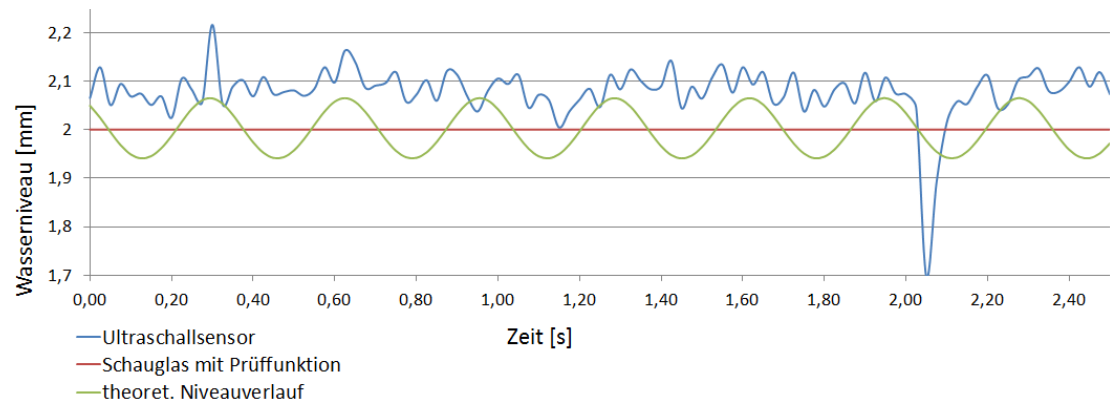
Theoretische Ringdicke 2 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



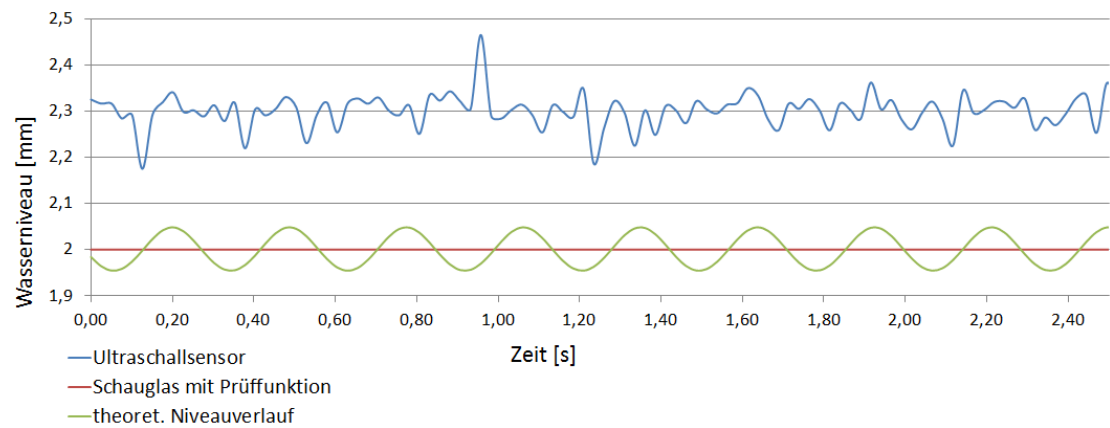
Theoretische Ringdicke 2 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



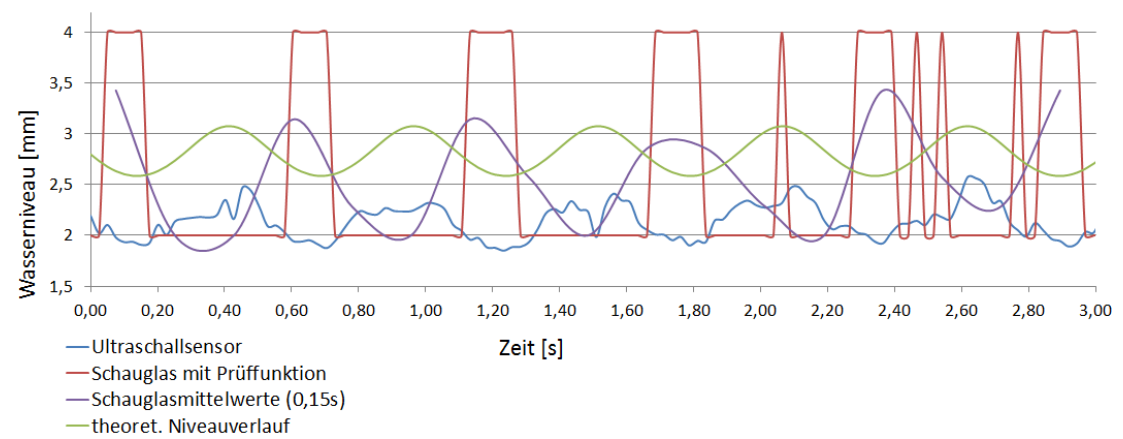
Theoretische Ringdicke 2 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



Theoretische Ringdicke 2 mm, Geschwindigkeit 1150 m/min:

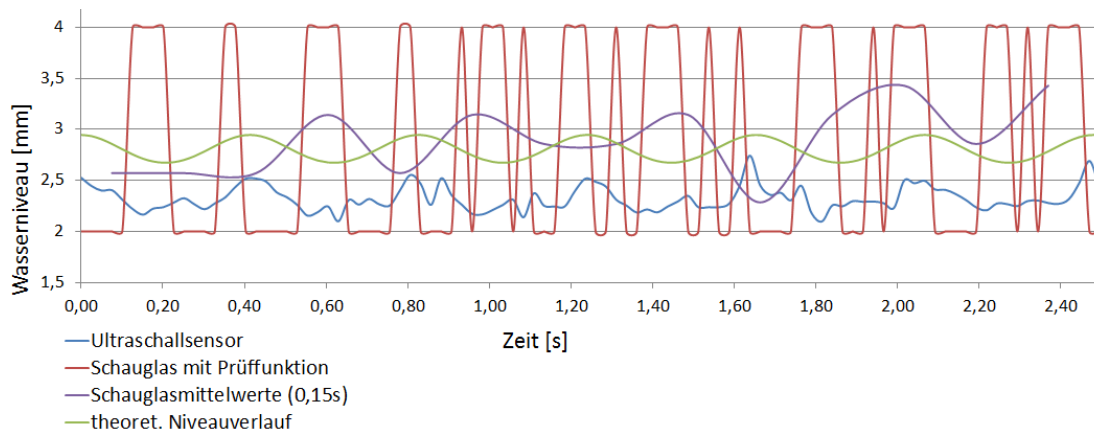


Theoretische Ringdicke 2,8 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:

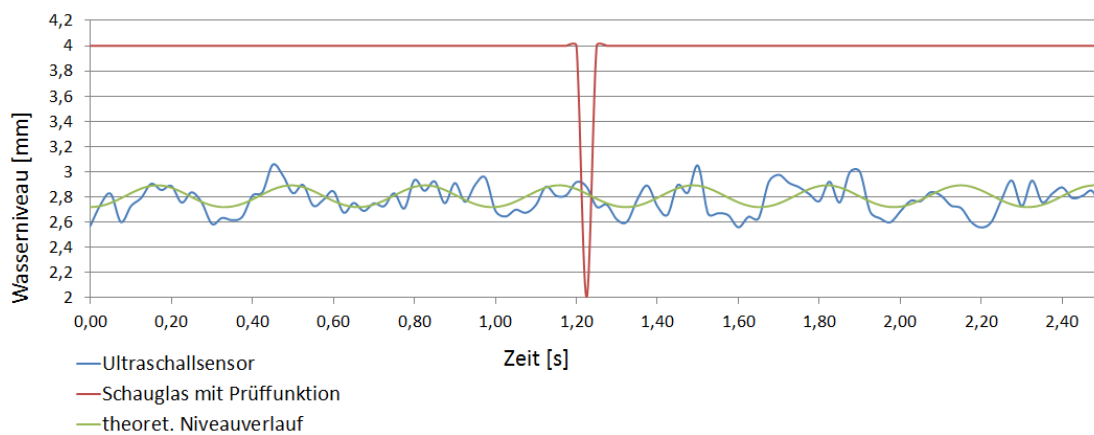




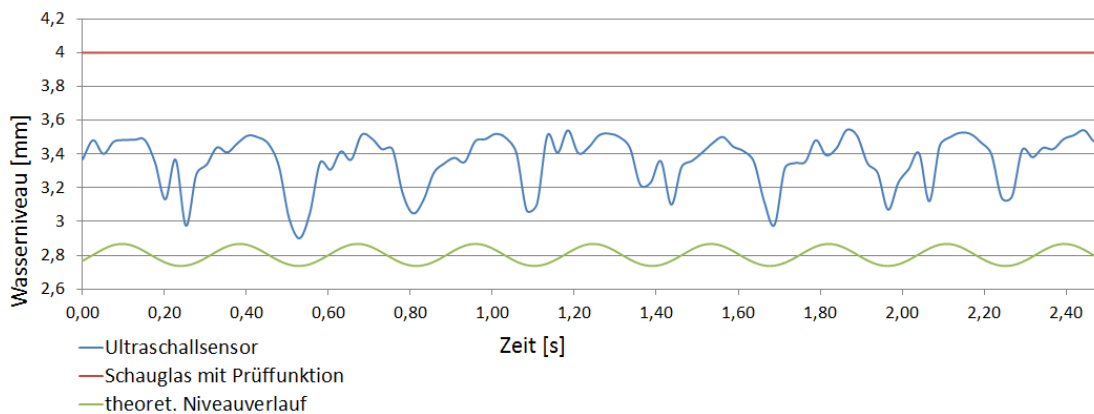
Theoretische Ringdicke 2,8 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



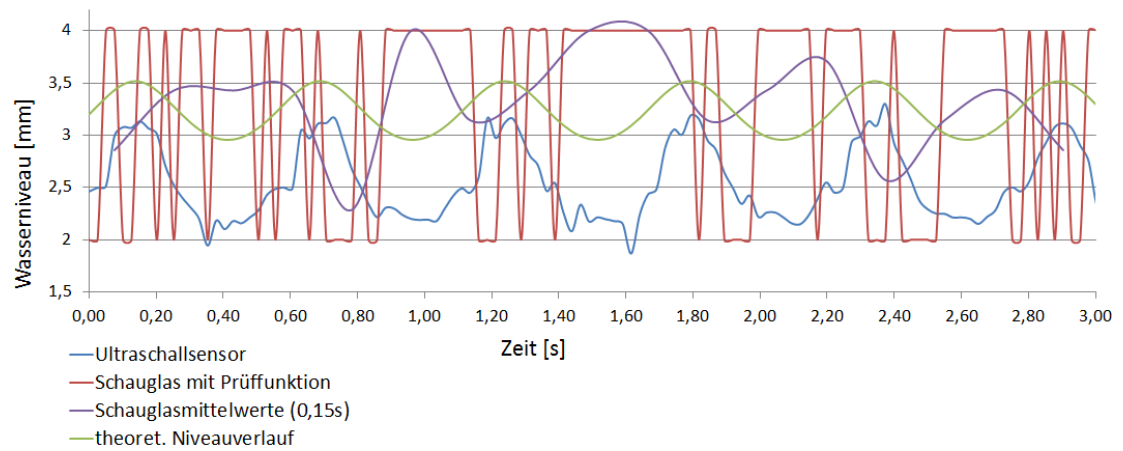
Theoretische Ringdicke 2,8 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



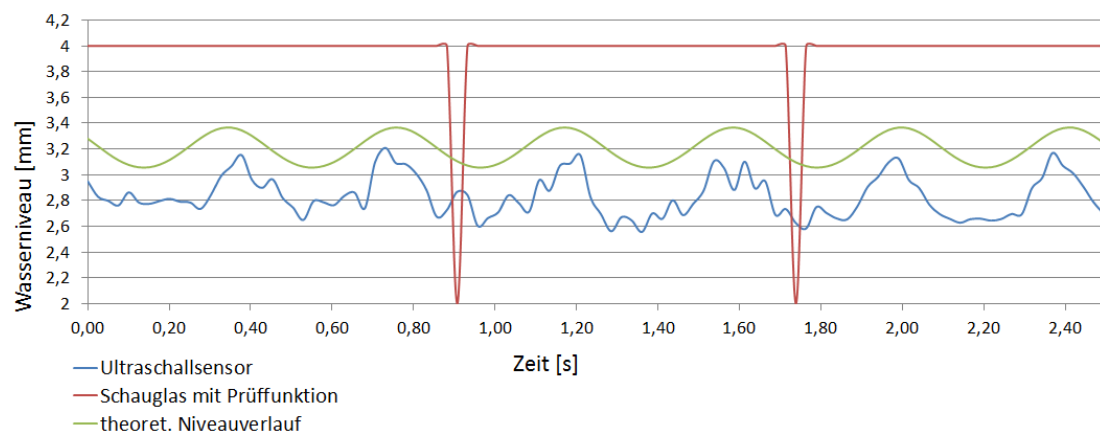
Theoretische Ringdicke 2,8 mm, Geschwindigkeit 1150 m/min:



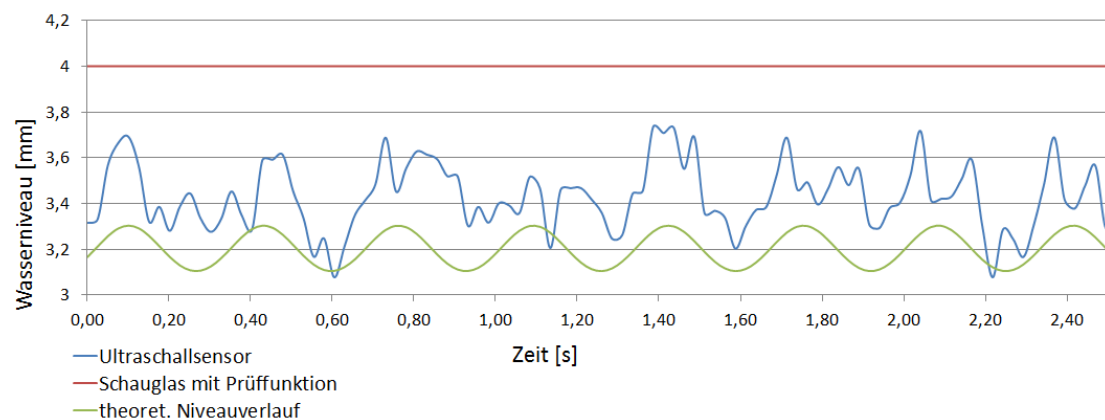
Theoretische Ringdicke 3,2 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



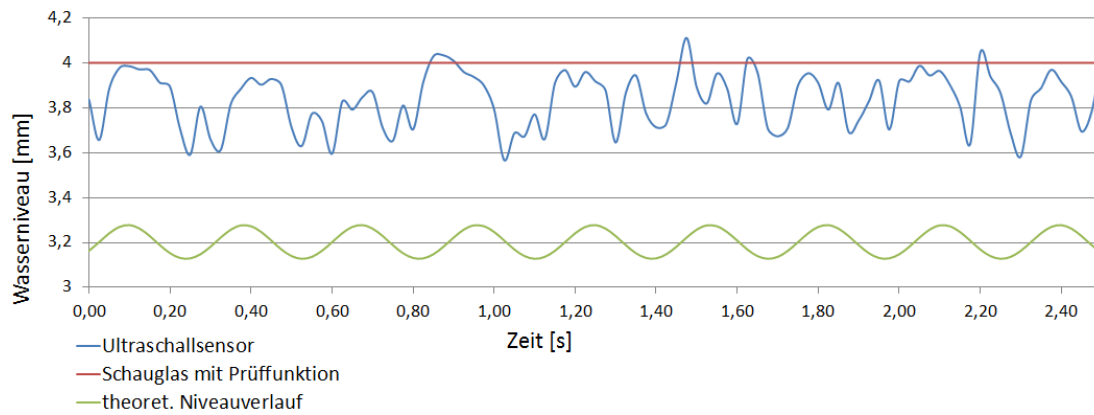
Theoretische Ringdicke 3,2 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



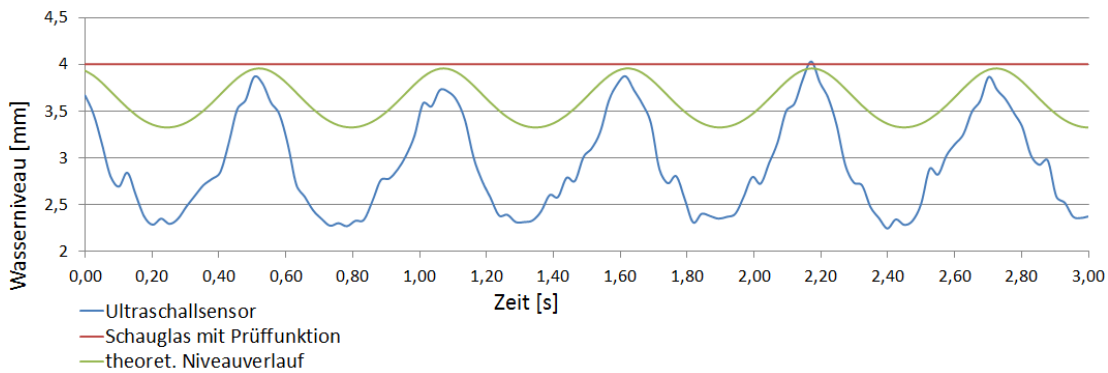
Theoretische Ringdicke 3,2 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



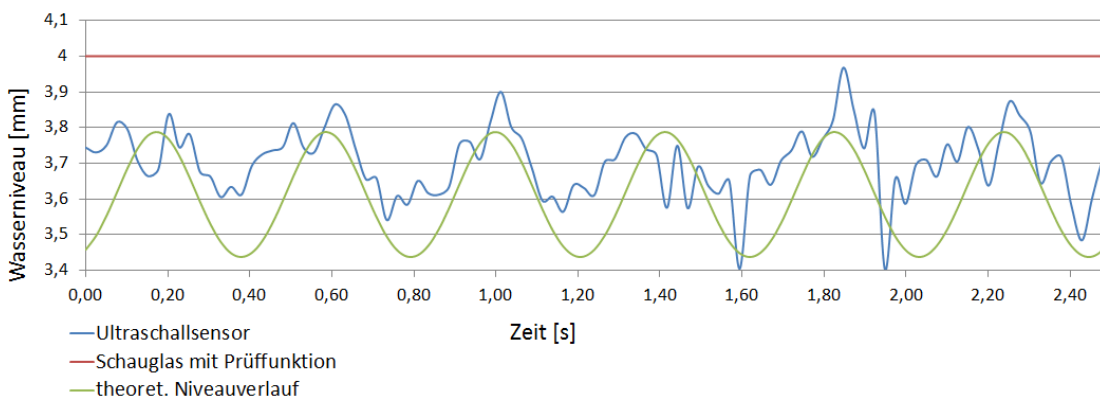
Theoretische Ringdicke 3,2 mm, Geschwindigkeit 1150 m/min:



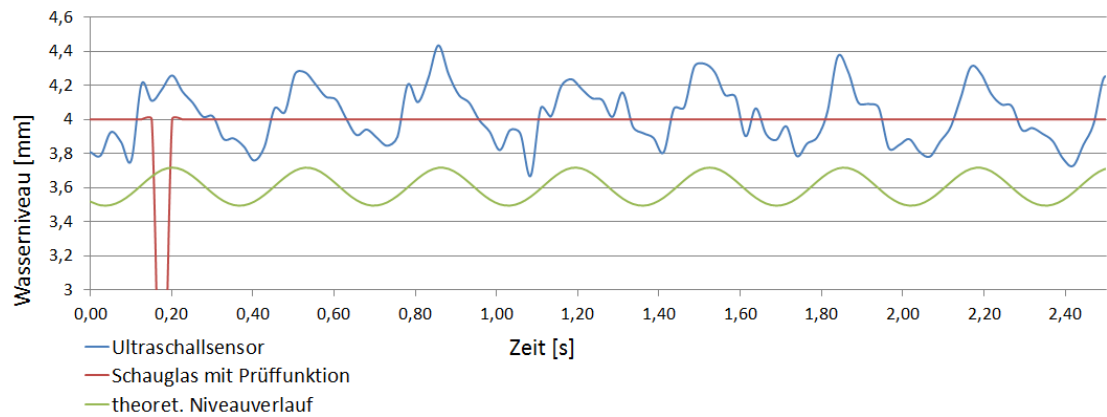
Theoretische Ringdicke 3,6 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



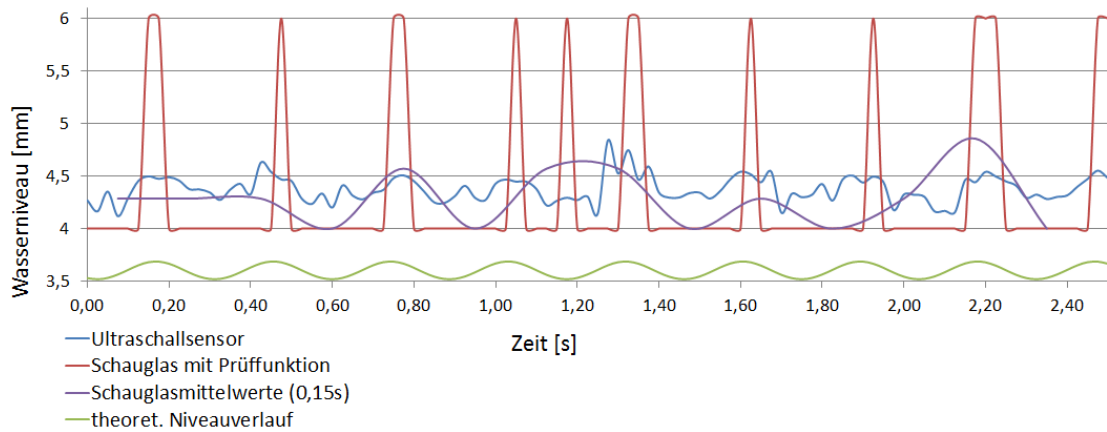
Theoretische Ringdicke 3,6 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



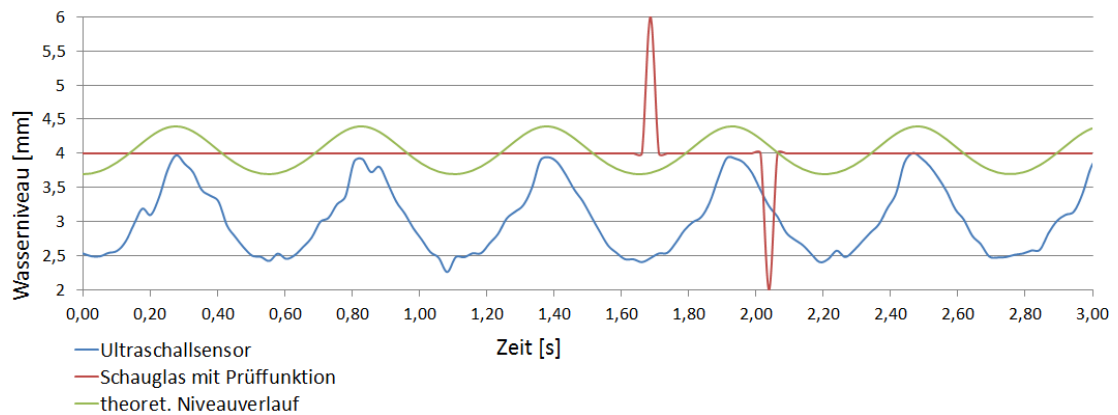
Theoretische Ringdicke 3,6 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



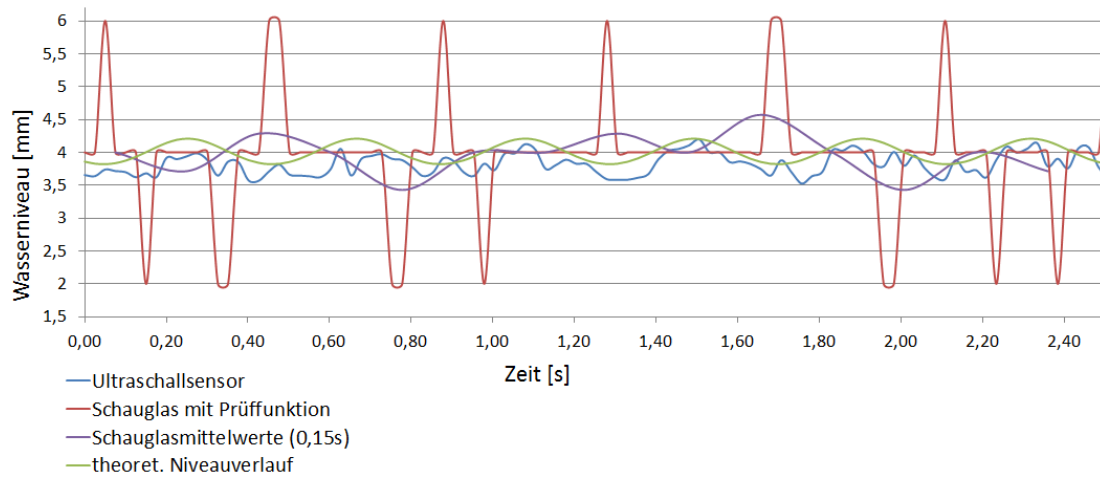
Theoretische Ringdicke 3,6 mm, Geschwindigkeit 1150 m/min:



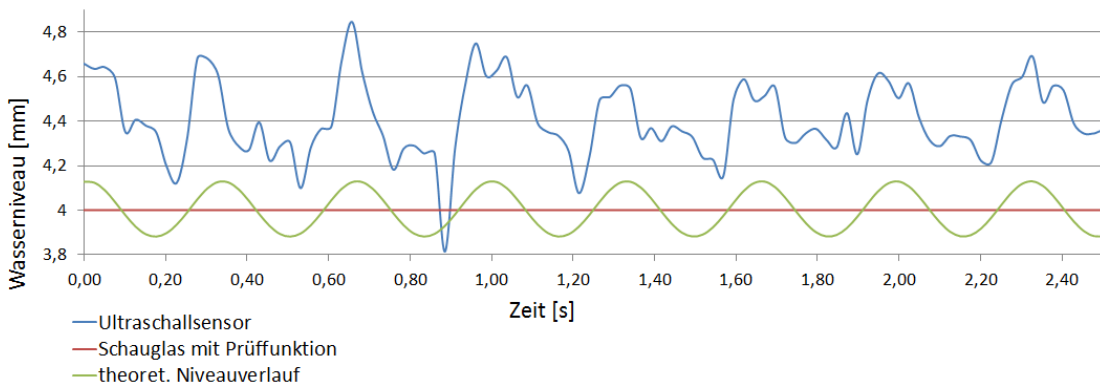
Theoretische Ringdicke 4 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



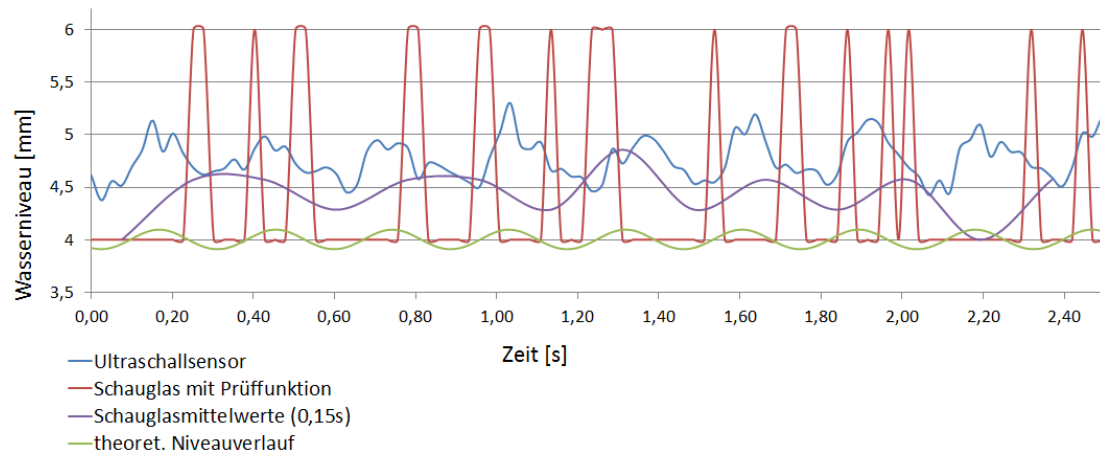
Theoretische Ringdicke 4 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



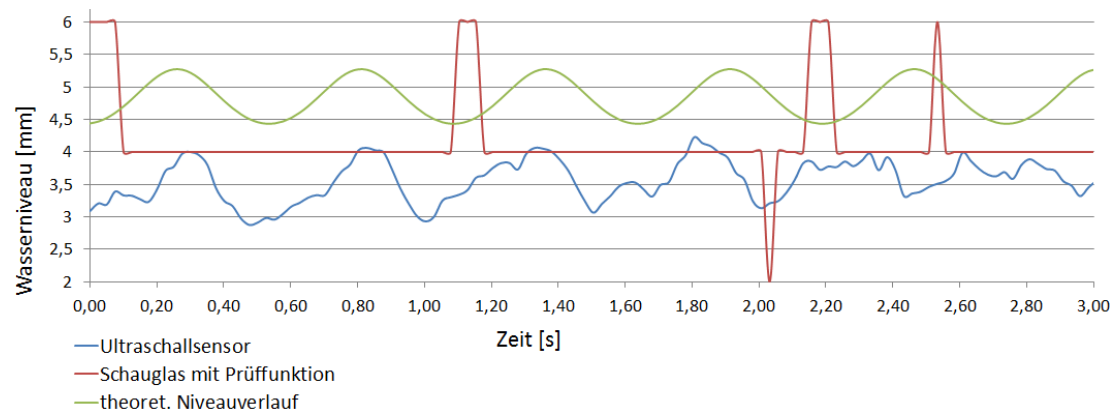
Theoretische Ringdicke 4 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



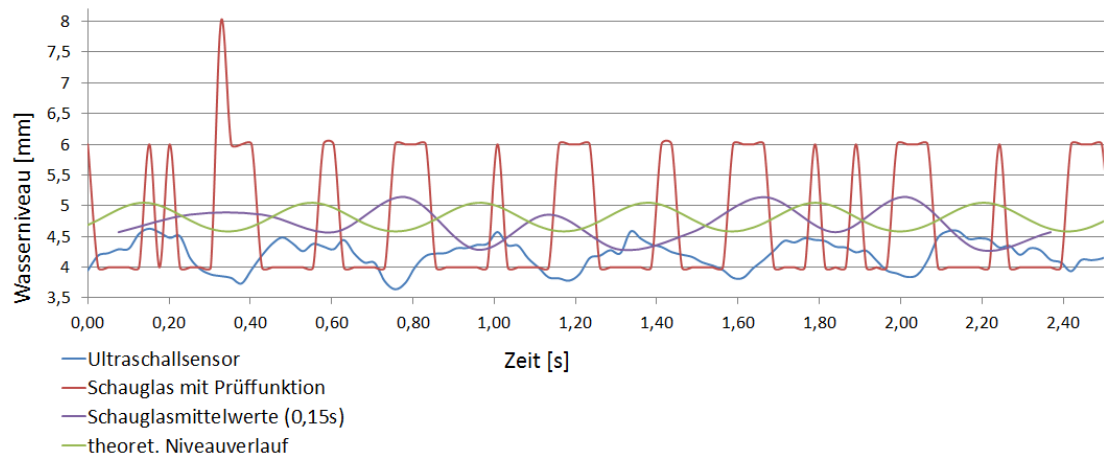
Theoretische Ringdicke 4 mm, Geschwindigkeit 1150 m/min:



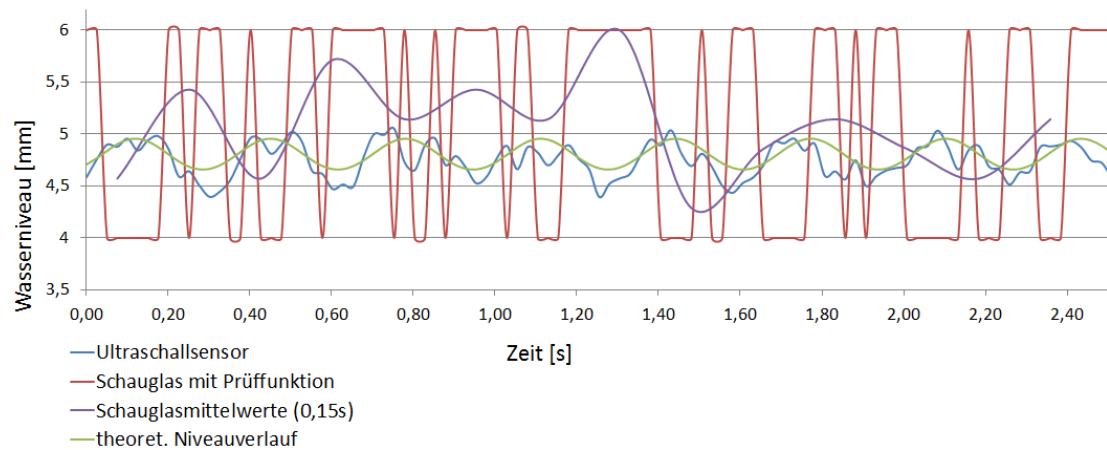
Theoretische Ringdicke 4,8 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



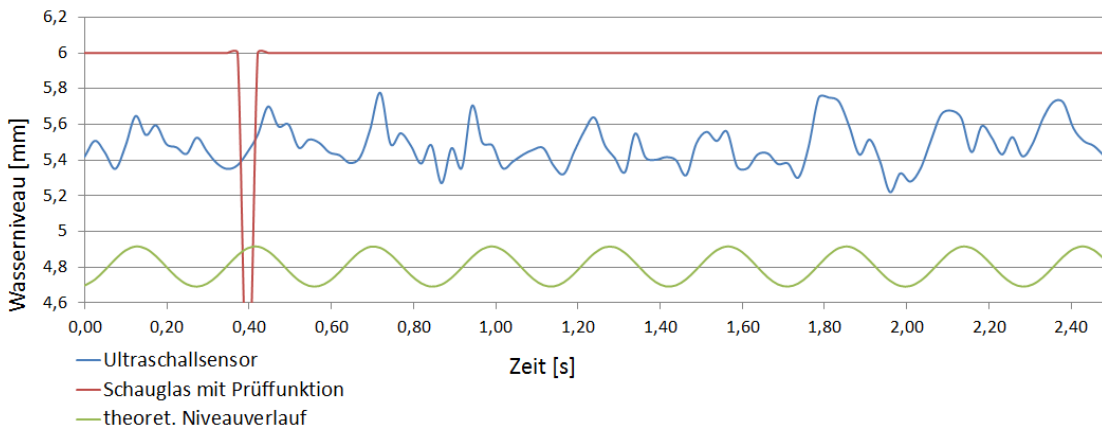
Theoretische Ringdicke 4,8 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



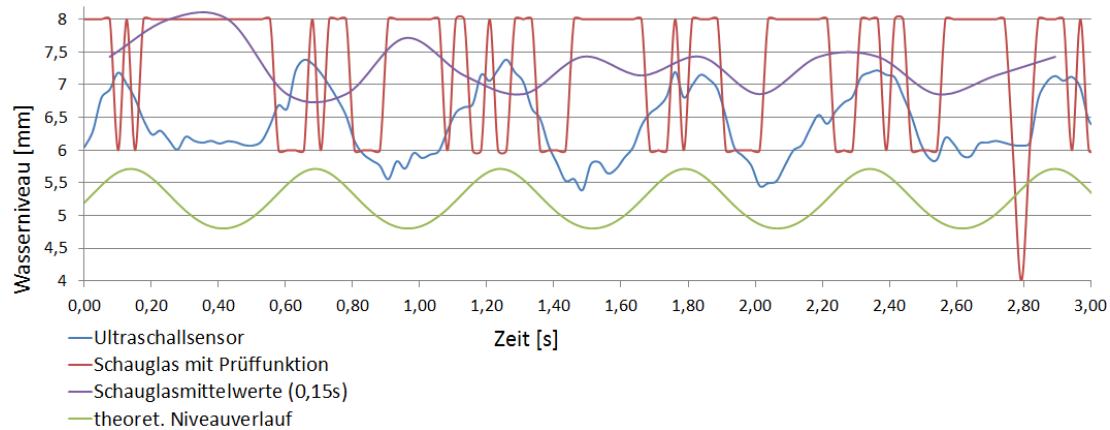
Theoretische Ringdicke 4,8 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



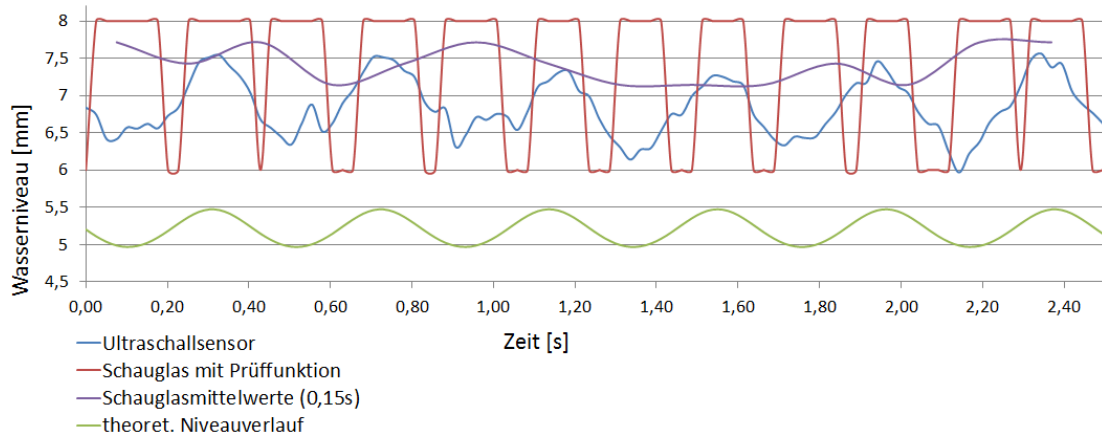
Theoretische Ringdicke 4,8 mm, Geschwindigkeit 1150 m/min:



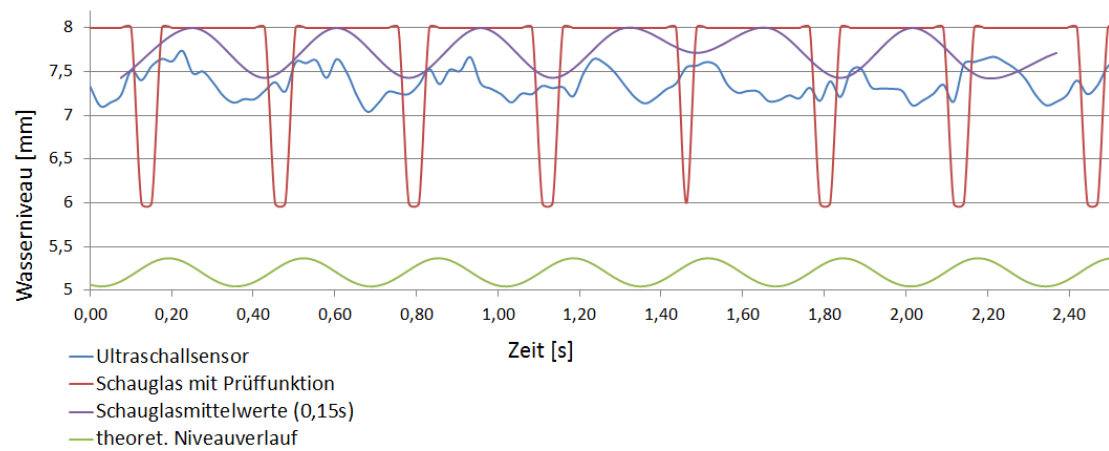
Theoretische Ringdicke 5,2 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



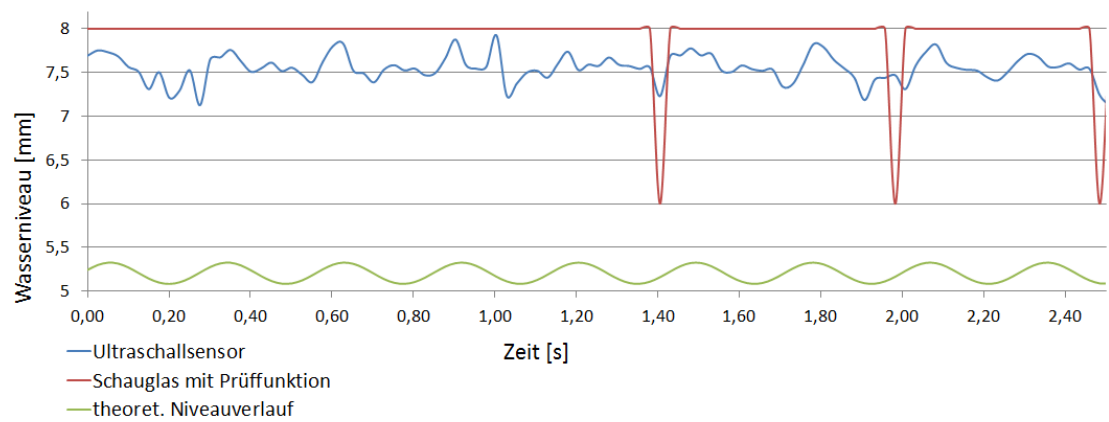
Theoretische Ringdicke 5,2 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



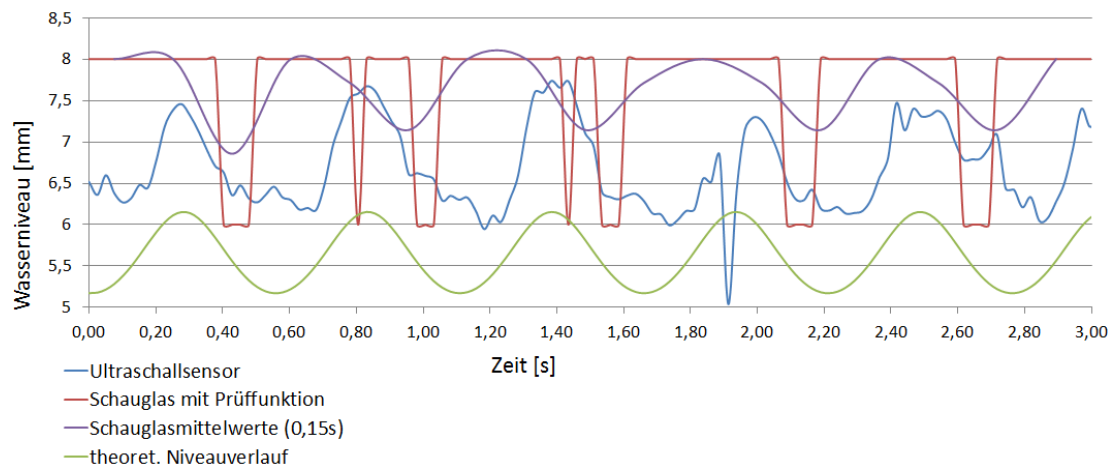
Theoretische Ringdicke 5,2 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



Theoretische Ringdicke 5,2 mm, Geschwindigkeit 1150 m/min:

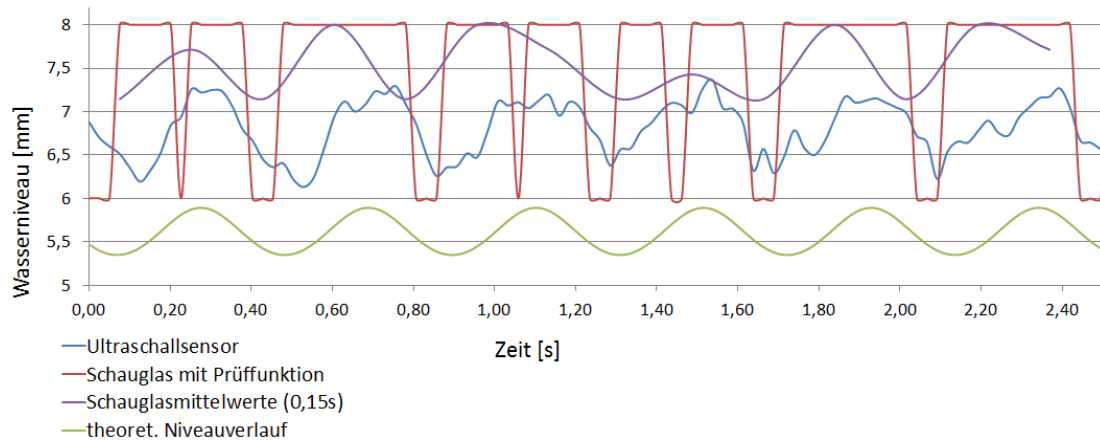


Theoretische Ringdicke 5,6 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:

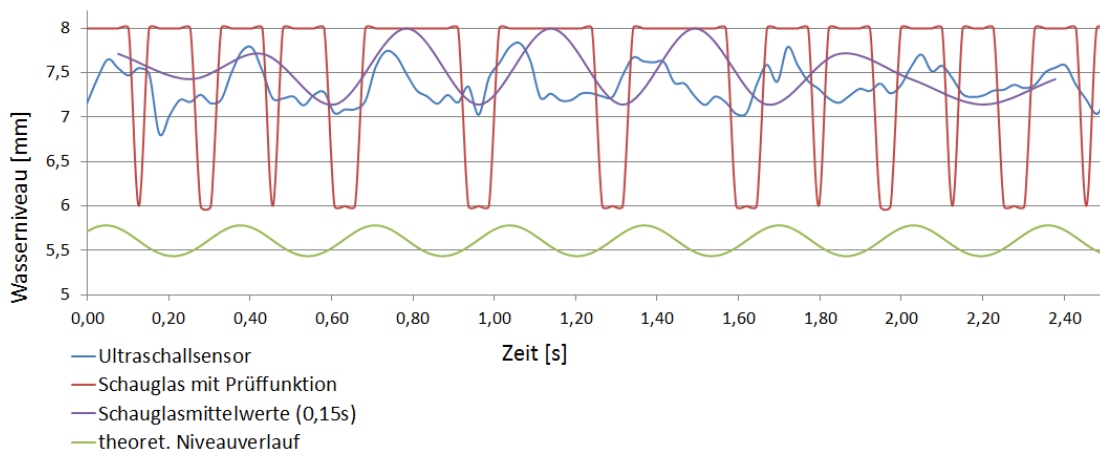




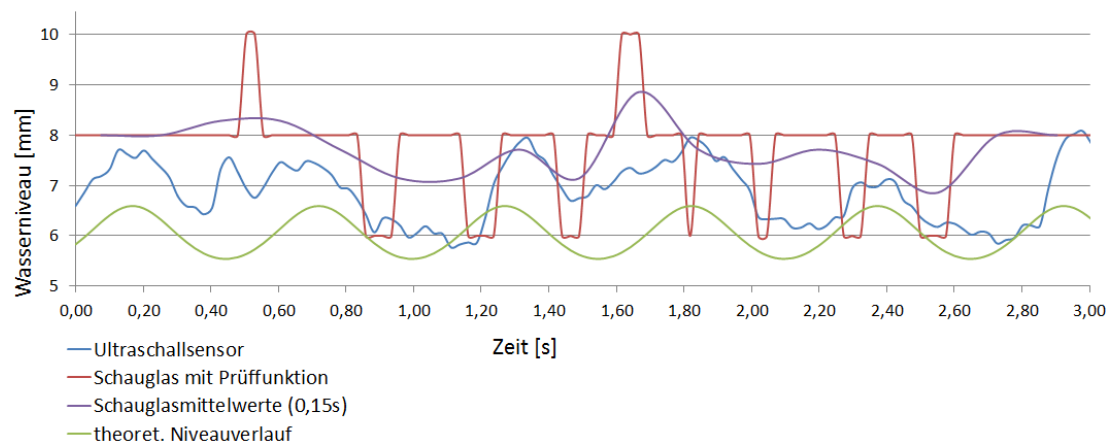
Theoretische Ringdicke 5,6 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



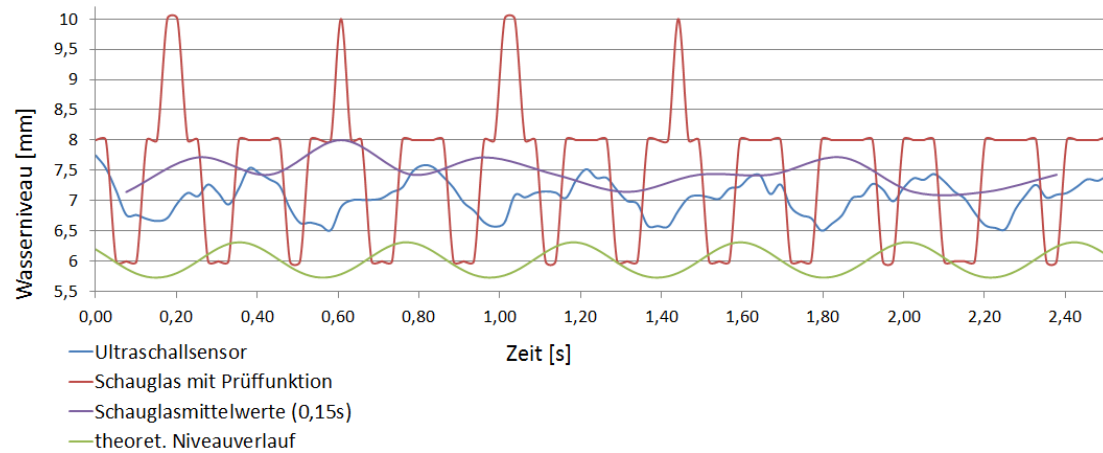
Theoretische Ringdicke 5,6 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



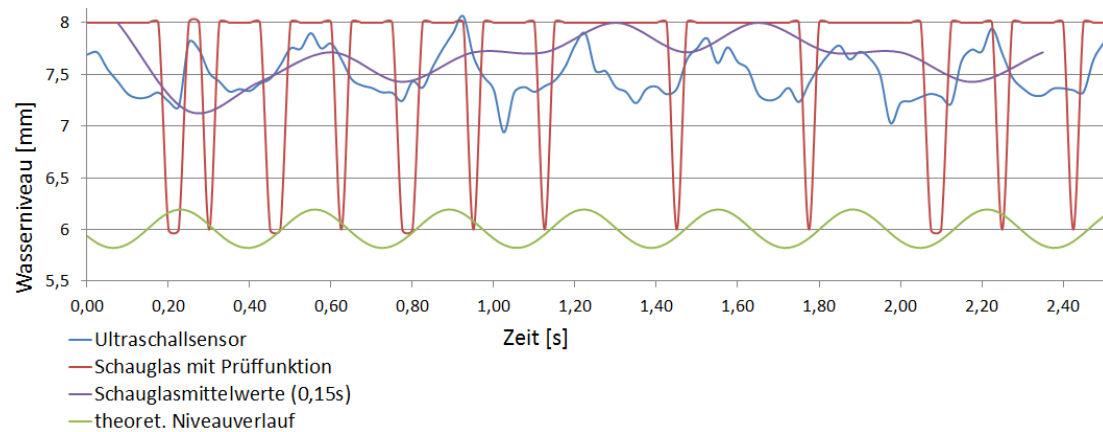
Theoretische Ringdicke 6 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



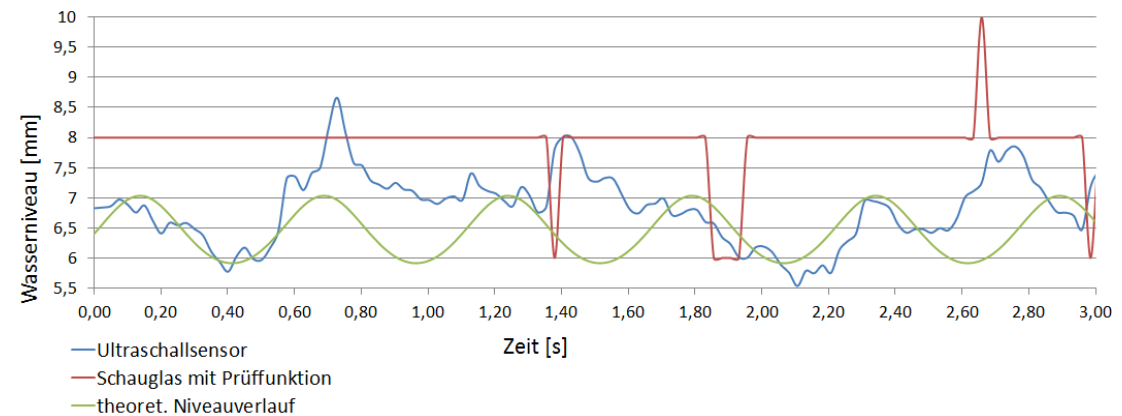
Theoretische Ringdicke 6 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



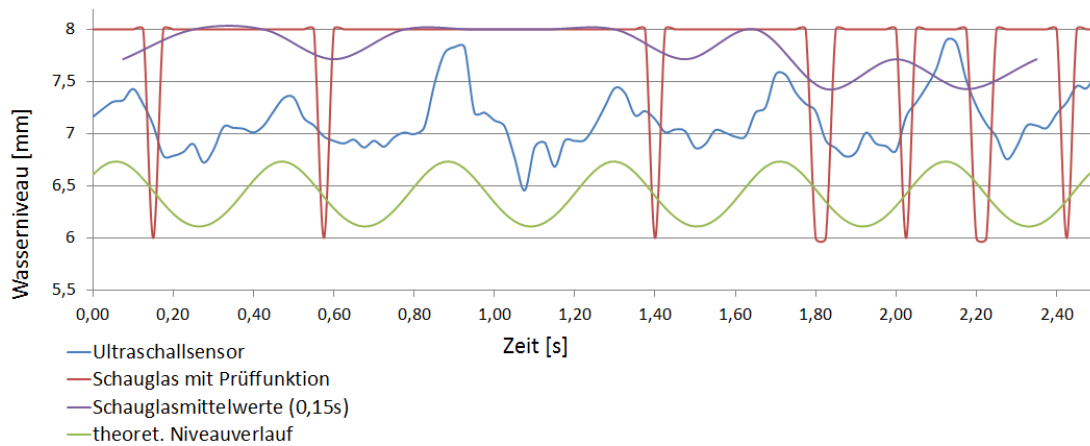
Theoretische Ringdicke 6 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



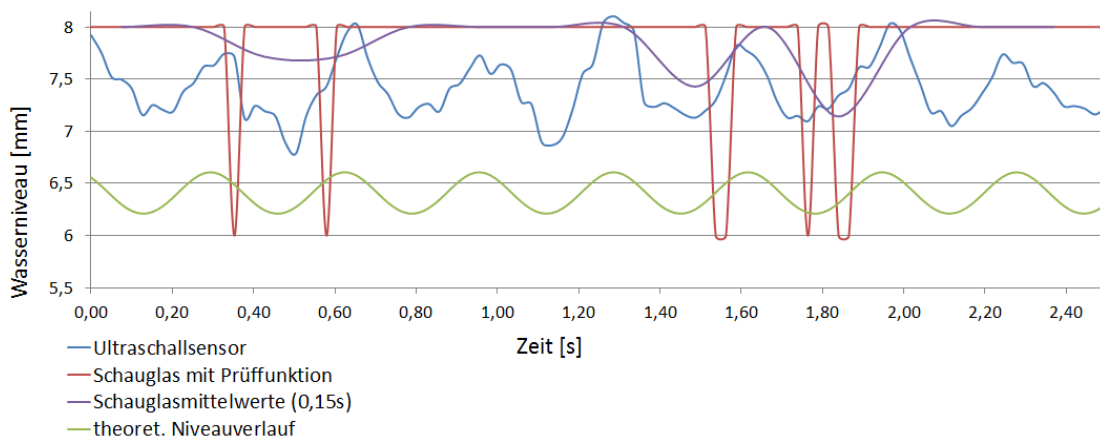
Theoretische Ringdicke 6,4 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



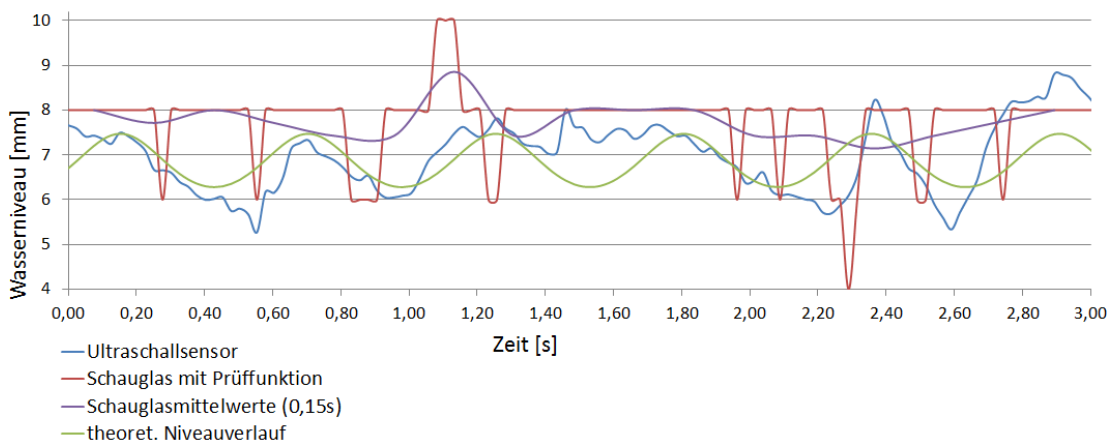
Theoretische Ringdicke 6,4 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



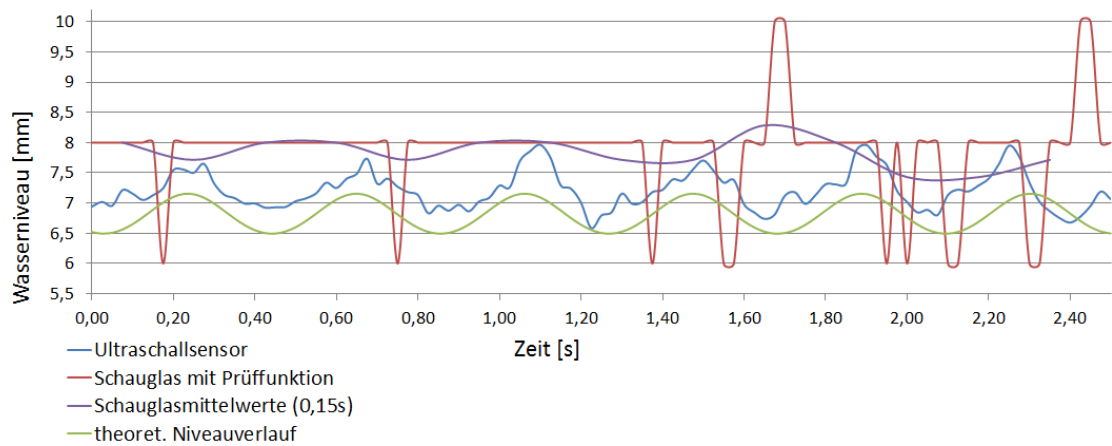
Theoretische Ringdicke 6,4 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



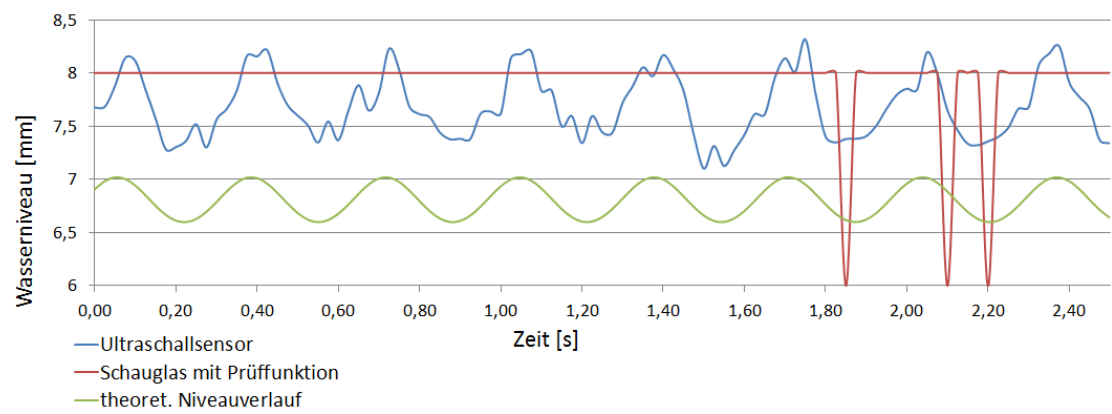
Theoretische Ringdicke 6,8 mm, Geschwindigkeit 600 m/min:



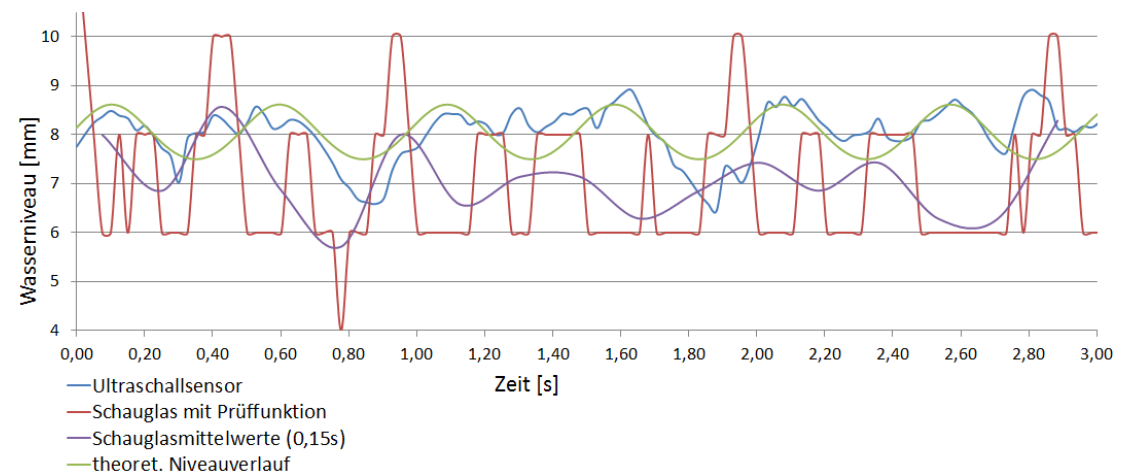
Theoretische Ringdicke 6,8 mm, Geschwindigkeit 800 m/min:



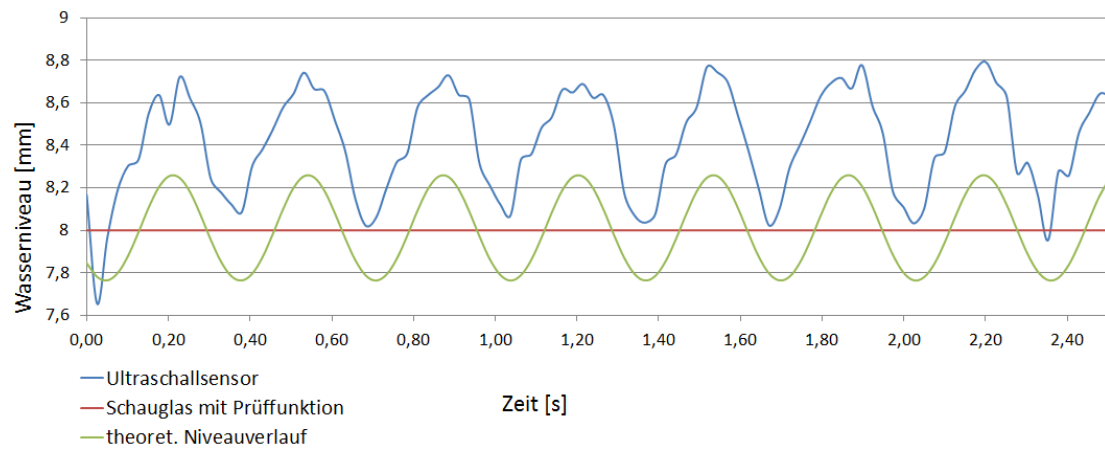
Theoretische Ringdicke 6,8 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



Theoretische Ringdicke 8 mm, Geschwindigkeit 670 m/min:



Theoretische Ringdicke 8 mm, Geschwindigkeit 1000 m/min:



## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Meidling im Tal, den 22.01.2013

Helmut Auer